

A GALAXISOK VILÁGA

TÓTH L. VIKTOR

A galaxisok világa

Tóth L. Viktor

A galaxisok világa

Tóth L. Viktor

Szerzői jog © 2013 Eötvös Loránd Tudományegyetem

E könyv kutatási és oktatási célokra szabadon használható. Bármilyen formában való sokszorosítása a jogtulajdonos írásos engedélyéhez kötött.

Készült a TÁMOP-4.1.2.A/1-11/1-2011-0073 számú, „E-learning természettudományos tartalomfejlesztés az ELTE TTK-n” című projekt keretében. Konzorciumvezető: Eötvös Loránd Tudományegyetem, konzorciumi tagok: ELTE TTK Hallgatói Alapítvány, ITStudy Hungary Számítástechnikai Oktató- és Kutatóközpont Kft.

Nemzeti Fejlesztési Ügynökség
www.ujszechenyiterv.gov.hu
06 40 638 638



A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.



Tartalom

Előszó	vii
1. Bevezetés	1
1.1 Ködök	1
1.2. Világmodellek – a Shapley-Curtis vita	4
1.2.1. A Shapley-Curtis vita főbb kérdései:	5
1.2.2. A Shapley-Curtis vita tudományos előzményei és háttere:	5
Referenciák és további olvasnivaló az előszó és az 1. fejezet témájában:	7
2. Távolságmérés és az extragalaxisok felfedezése	10
2.1. Trigonometrikus parallaxis, a parszek definíciója	10
2.2. A fotometriai (radiometriai) parallaxis módszerekről	11
2.3. Távolságmérési módszerek fajtái és hatókörük	12
2.4. Spektroszkópiai parallaxis	13
2.5. A Tully-Fisher reláció	13
2.6. A Faber-Jackson reláció	15
2.6.1. A $D-\sigma$ reláció	16
2.7. Távolságmérés felületi fényesség fluktuációjából	17
2.8. Ia típusú szupernóvák és távolságmérés	18
2.9. A cefeida parallaxis	23
2.9.1. A periódus-luminozitás reláció	23
2.9.2. A cefeidák használatának előnye a távolság meghatározásban	27
2.9.3. A cefeida pulzáló változók fizikai leírásának alapjai	27
2.9.4. A periódus-luminozitás reláció alkalmazása a gyakorlatban	28
2.10. A P-L módszer néhány tudománytörténetben fontos alkalmazása	30
2.10.1. Shapley – távoli gömbhalmazok	30
2.10.2. Hubble – vannak extragalaxisok	31
2.10.3. A Hubble állandó	32
2.10.4. Sandage és Tamman – a Hubble állandó korrekciója	33
2.11. Távolság meghatározása a Hubble törvénnyel	33
Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:	35
3. Alaktani osztályozás, Hubble séma.	39
3.1 Hubble-Sandage osztályozás	39
3.1.1. A Hubble-féle osztályok – „hangvilla”	40
3.1.2. A Hubble-féle morfológiai osztályozás hiányosságai	52
3.1.3. A Hubble-féle osztályozás finomításai	53
3.1.4. A Hubble osztályozásba nem illeszthető galaxisok	61
3.2. A morfológiai osztályozási sémák összehasonlítása	62
3.3. Fizikai paraméterek és szerkezet kapcsolata	62
Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:	63
4. Elliptikus galaxisok	66
4.1 Óriás és közepes elliptikus galaxisok	66
4.1.1. Az elliptikus galaxisok morfológiája	67
4.1.2. Az elliptikus galaxisok sűrűségmodellje	71
4.1.3. Az elliptikus galaxisok kinematikája	73
4.1.4. Az elliptikus galaxisok csillagtartalma	74
4.1.5. Csillagközi anyag elliptikus galaxisokban	74
4.1.6. Fekete lyuk elliptikus galaxisok középpontjában	74
4.1.7. Az elliptikus galaxisok eloszlása	75
4.2 Törpe elliptikus galaxisok	75
Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:	76
5. Spirálgalaxisok	77
5.1. A galaxisok fő összetevői	77
5.2. Spirálkar indikátorok	77
5.2.1. A spirálkarok megjelenési formái	77
5.2.2. OB asszociációk és HII zónák	78
5.2.3. Óriás molekulafelhők és HI szuperfelhők	78

5.3. Spirálgalaxisok alrendszerei	79
5.3.1. Korong	80
5.3.2. Dudor – bulge	82
5.3.3. Barionos, vagy csillagos halo	84
5.3.4. Sötétanyag halo	85
5.4. Csillagközi anyag	85
5.5. Forgás és rotációs görbe	89
5.5.1. Nyírási és forgási együtthatók, nyírási ráta	89
5.5.2. A rotációs görbe	89
5.6. A korong stabilitása	89
5.7. Csillagkeletkezés	91
5.7.1. A Schmidt-törvény	91
5.7.2. Spirálkarok és csillagkeletkezés	92
Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:	94
6. Anomális galaxisok: kompakt és irreguláris rendszerek	96
6.1. Kék kompakt galaxisok	96
6.2. Irreguláris galaxisok	100
6.3. Ultrakompakt galaxisok	106
Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:	106
7. Extragalaxis katalógusok, extragalaxis atlaszok	108
7.1. NED a NASA Extragalaktikus Adatbázisa	108
7.1.1. NED	108
7.1.2. Az NED használata - keresés	115
7.1.3. Hasznos eszközök az NED-ben	115
7.2. Atlaszok	116
7.2.1. A Hubble Atlasz	116
7.2.2. Van Den Bergh törpegalaxis katalógusa	116
7.2.3. Az Arp-féle <i>Különleges galaxisok atlasza</i>	117
7.2.4. A Morgan-féle formatípusok:	118
Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:	119
8. A galaxisok állapotjelzői és meghatározásuk	120
8.1. A galaxisok fotometriai és spektrális tulajdonságai	120
8.1.1. Felületi fényesség	120
8.1.2. A Holmberg sugár	125
8.1.3. Galaxisok látszó fényessége	126
8.1.4. Abszolút fényesség	127
8.1.5. A galaxis fényességének és morfológiai osztályának kapcsolata	127
8.1.6. Spektrális energia-eloszlás	129
8.1.7. A galaxisok színe	130
8.1.8. Schechter-féle luminozitási függvény	134
8.1.9. Galaxis spektruma – spektrumvonalak	135
8.2. A galaxisok tömege	137
8.2.1. Rotációs spektrum	137
8.2.2. A rotációs görbe	138
8.2.3. A tömegeloszlás	140
8.3. A gravitációs lencse jelenség	141
8.3.1. Távolságok	141
8.3.2. Gravitációs lencsézés rövid története	141
8.3.3. A lencse-egyenlet:	142
8.3.4. Az Einstein-sugár	143
Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:	144
9. Kölcsönható galaxisok	147
9.1. Megfigyelt kölcsönható rendszerek	147
9.2. Kölcsönható rendszerek modellezése	148
9.3. Galaxis ütközések és galaxis-fejlődés	150
9.4. Csillagontó (starburst) galaxisok	152
9.4.1. Csillagkeletkezési ráta, csillagontó galaxisok	152
9.4.2. A csillagkeletkezési aktivitás mérése	153

9.4.3. Törpe csillagontó galaxisok – HII galaxisok	154
Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:	154
10. Aktív magú galaxisok, kvazárok	155
10.1. Seyfert galaxisok	155
10.2 LINER-ek	157
10.3. BL Lac - blazárok	158
10.4. Rádió hangos AGN	159
10.4.1. A BLRG és NLRG osztályok	160
10.4.2. Az NLRG alosztályai az FRI és FR II típusok:	160
10.5. Kvazárok	161
10.6. Aktív galaxismaggal rendelkező rendszerek egyesített modellje	163
10.6.1. Az aktív galaxismaggal rendelkező objektumok spektrumai	163
10.6.2. Az aktív galaxismag mérete	164
10.6.3. Az aktív galaxismag luminozitása és energiatermelése	165
10.6.4. Az aktív galaxismag működése	166
10.6.5. A látóirány szerepe a mérhető paraméterek alakulásában	170
Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:	172
11. A galaxisok térbeli eloszlása, galaxiscsoportok és –halmazok, szuperhalmazok	174
11.1. Galaxis csoport és halmaz	174
11.1.1. Óriás galaxis és szatellitái	174
11.1.2. Galaxis csoport	175
11.1.3. Galaxishalmaz	175
11.1.4. Röntgen sugárzó forró gáz galaxishalmazokban	176
11.2. A Lokális Csoport	176
11.3. A Virgo szuperhalmaz	177
11.4. A Nagy Mozgató (Great Attractor)	179
11.5. Falak és üregek rendszere	181
11.5.1. A Nagy Fal (Great Wall)	181
11.5.2. Az Univerzum méhsejtes szerkezete	181
Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:	184
12. Függelék	186
12.1. Spektrális felbontás	186
12.2. Detektor jellemző paraméterei	186
12.3. Spektrumvonal félérték-szélessége	186
12.4. Fotometriai rendszerek	187
12.4.1. Johnson fotometriai rendszer	187
12.4.2. Az SDSS fotometriai rendszere	188
12.4.3. A DDO fotometriai rendszer	190
12.5. Vöröseltolódás	191
12.6. Spektroszkópiai felmérések a galaxisok eloszlására	191
12.6.1. Látható és közeli-infravörös felmérések ABC sorrendben:	191
12.6.2. Felmerések más hullámhossz sávokban:	193
12.6.3. Kiseb és kevésbé mély felmerések (N<5000):	193
12.6.4. További mély felmerések:	193
12.7. A HI 21cm-es spektrumvonal	194
12.8. Kémiai összetétel, vas-hidrogén index	195
12.9. A Hubble típusok gyakorisága Marik (1989) szerint:	196
Referenciák és további olvasnivaló a függelék témáiban:	197
13. Animációk	198
13.1. Az Ia típusú szupernóva fénygörbe illesztése – interaktív	198
13.2. A hidrogén atom energiaszintjei – interaktív	198
13.3. Szupernóva a NGC1365 galaxisban	198
13.4. A Centaurus A óriás elliptikus galaxis	198
13.5. Az NGC253 „Sculptor” spirálgalaxis	198
13.6. A Pinwheel galaxis 4 hullámsávban	198
13.7. Az M81 és fényes nukleusza	198
13.8. Az M83 látható és infravörös képei	199
13.9. Az NGC 7424 Seyfert I galaxis	199

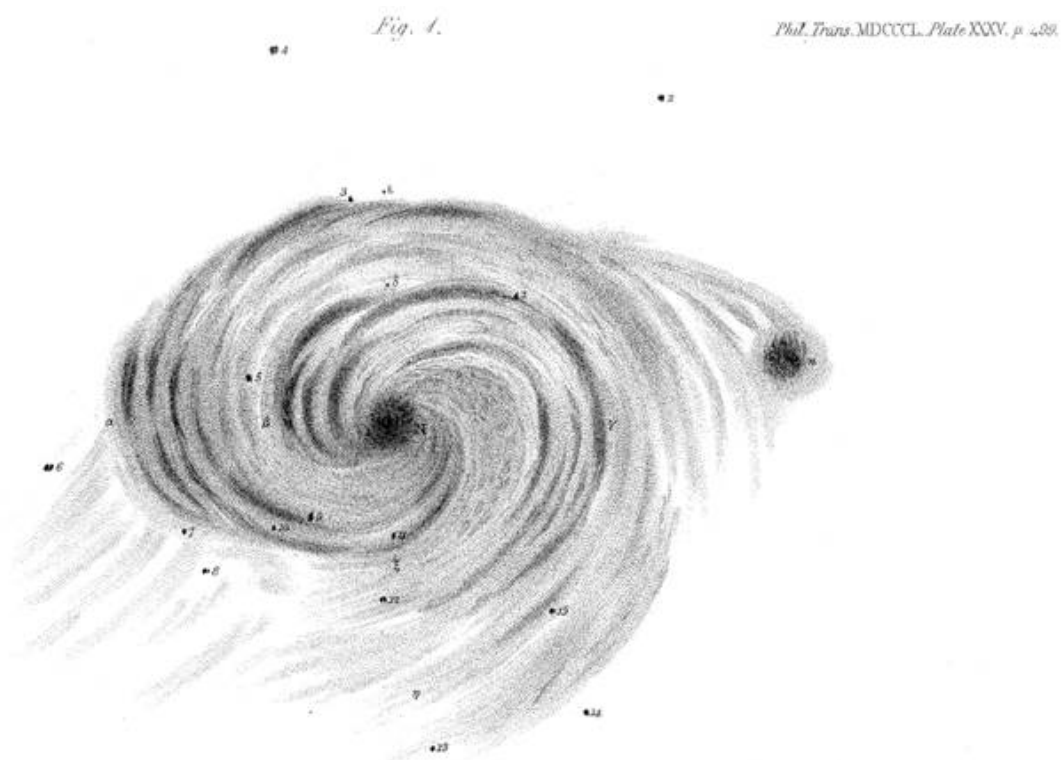
13.10. Az NGC 1313 starburst galaxis	199
13.11. A Nagy Magellán Felhő LMC	199
13.12. Az NGC 6872-IC 4970 kölcsönható galaxisok	199
13.13. Az NGC6769-NGC6770 hármasrendszer	199
13.14. Az M51 spirálgalaxis	199

Előszó

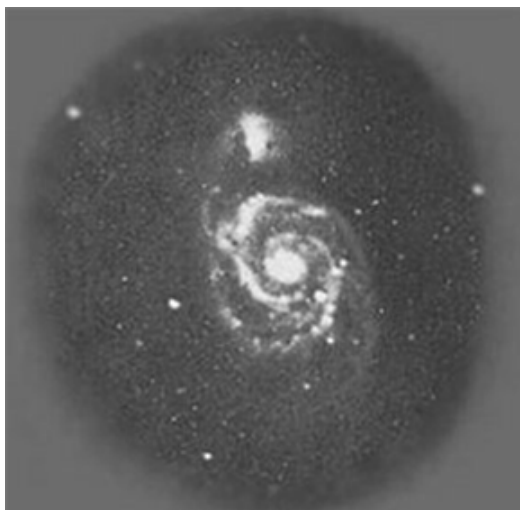
“Innen az extragalaxisokat vizsgálni olyan, mintha egy bolhát beleültetnénk egy öveg lekvárba és arra kérnénk, figyelje meg a külvilágot. ... Mai óránk háziállata a bolha.”

—Marik Miklós, egyik csillagászat előadásán

A galaxisok ismerete már több mint 100 éve része az általános műveltségnek. „Csillagködöket” ábrázoló képeket már a 19. század végén közöltek ismeretterjesztő kiadványokban is, mint például Camille Flammarion l’Astronomie folyóirat sorozata volt, melyben 1888-ban megjelent Isaac Roberts Andromeda galaxisról készített felvételének reprodukciója. Az Androméda galaxis szabad szemmel is látható, és tudjuk, hogy már 1000 évvel korábban is ismerték (lásd 1.1 alfejezet), 800 évvel megelőzve Charles Messier-t akinek 1771-ben megjelent katalógusában ez a 31-es számú, azaz az M31. A l’Astronomie 1889-ben viszont egy olyan fotót közölt Robertstől a Messier által a Vadászebek csillagképben (Canes Venatici) felfedezett M51-es galaxisról, ami művészeti alkotásban is megjelent. Az M51 távcsővel felbontott szerkezete nyomán kapta az „Örvény-galaxis” nevet. Az első rajzot William Parsons, Rosse grófja közölte róla (0.1. ábra).



0.1. ábra: Az Örvény-galaxis (M51) - Lord Rosse (William Parsons) rajza (Parsons 1850), <http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/140/499.full.pdf>



0.2. ábra: Az Örvény-galaxis (M51) Isaac Roberts felvételén.
<http://proto57.files.wordpress.com/2013/05/isaac-roberts-m51-and-m100.jpg>

Az ilyen ismeretterjesztő céllal közölt képek annak idején ugyanúgy motiválóak voltak, mint napjainkban, felkeltették, és felkeltik ma is a fizika és csillagászat iránti érdeklődést. A *Flammario*n kiadványaiban megjelent csillagászati képek, köztük a galaxisokéi inspirálhatták Vincent van Goghot, hogy a 1889-es *De sterrennacht* (*Csillagos éj*) festményére (0.3. ábra) az előző esti Vénusz és Hold látványa mellé egy spirál galaxishoz hasonló mintát is az égre fessen. Pedig az M51-et nem láthatta kórházi szobája ablakából kitekintve.



0.3. ábra: *Csillagos éj* (De sterrennacht) - Vincent van Gogh 1889 júniusában festette Saint-Rémy-de-Provenceban (Dél-Franciaország). A művészt az ég és táj éjjeli látványa mellett egy tudományos ismeretterjesztő cikk is inspirálhatta. A kép a New York-i Museum of Modern Art állandó kiállításán látható.
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Van_Gogh_-_Starry_Night_-_Google_Art_Project.jpg

Saját galaxisunk szerkezetét, melyet szabad szemmel csak, mint az éjszakai égbolton felderengő sáv látunk, úgy kell leírjuk, hogy nincs lehetőségünk rá, hogy kívülről vizsgáljuk. Az extragalaxisok kutatása azonban már a 19. század végétől ötleteket adott a Tejútrendszer szerkezetének felvázolására. Már ekkor felmerült, hogy egy spirálgalaxis. Gyakran ma is más óriás spirális galaxisokon teszteljük a Tejútrendszert leíró elméleteket.



0.4. ábra: A Tejút sávja a téli égbolton, egyik oldalán a Nagy Kutya (Canis Major), az Orion és a Bika (Taurus), a másikon az Ikrek (Gemini) csillagképekkel.

A galaxisok a Világegyetem kémiai összetétele megváltozásának színterei, a galaxisok csillagaiban épülnek fel a Világegyetemben a berilliumnál nehezebb elemek. A galaxisokban zajló csillagkeletkezés és csillagfejlődés vezet el a hélium és nagyobb rendszámú elemek relatív gyakoriságának növekedéséhez. Végül a galaxisok azok a „próbatestek” melyek a Világegyetem gravitációs terét segítenek feltérképezni helyük és sebességük mérésével.

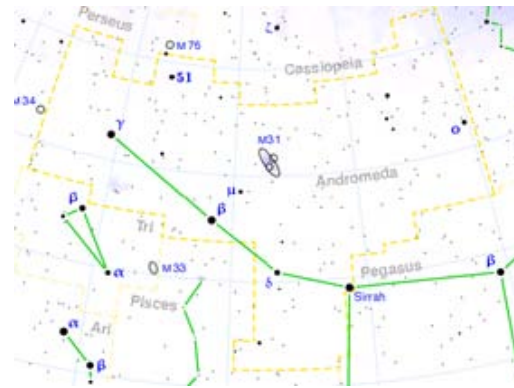
Galaktikus csillagászatról magyarul a Marik Miklós szerkesztésében megjelent „*Csillagászat*” c. könyv 5. és 6. fejezetében Balázs Béla, Balázs Lajos és Szécsényi-Nagy Gábor írtak összegzést az 1980-as évek elejéig felhalmozott ismeretekről és elméletekről. A téma kapott egy-egy fejezetet az egyetemi alapképzésben használt „*Bevezetés a csillagászatba*” (Balázs és mts. 1996) és „*Kozmikus fizika*” (Cserepes & Petrovay 1993) című egyetemi jegyzetekben is, illetve a nemrégiben a Szegedi Tudományegyetem honlapján megjelent „*Csillagászat*” (2012) elektronikus jegyzetben is. Ez a jegyzet az ugyanilyen névvel futó kollokvium segédleteként készült. Külön köszönet mondok Balázs Lajosnak a kurzus oktatójának az általa használt diáorok átadásáért, valamint a jegyzet lektorálásáért.

1. fejezet - Bevezetés

Röviden áttekintjük a fényes ködök leírásától az extragalaxisok felfedezéséig vezető tudománytörténeti utat.

1.1 Ködök

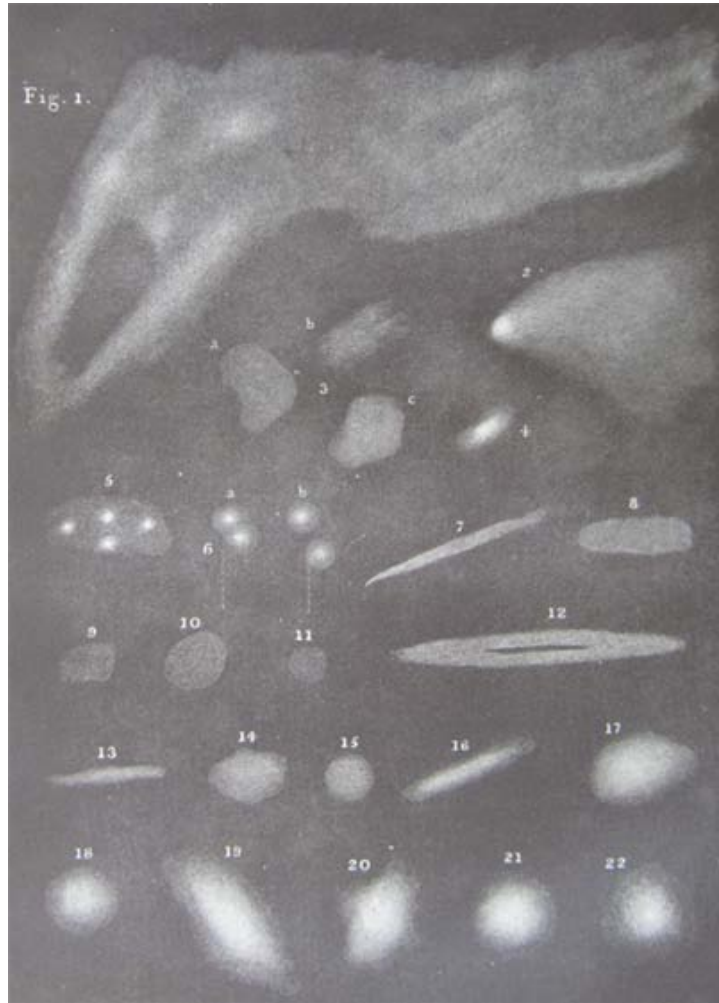
Abū al-Husayn ‘Abd al-Rahmān ibn ‘Umar al-Sūfī (Abd al-Rahman al-Sufi, perzsául: *ابوالرحمن صوفی*) a „*Kitāb Suwar alKawākib al-Thābitah*” (magyarul „Az állócsillagok képeinek könyve”) című eredetileg arab nyelvű munkájában 964-ben az Androméda galaxist, mint ködös csillag említi a (Ptolemaios Almagest-jében megadott) Androméda csillagkép 14-es számú csillaga felett. Tycho Brahe az „*Astronomiae Instaurate Progyrnasmata*” 1602-ben megjelent könyvében hat nebulát sorol fel.



1.1. ábra: Az M31 (Androméda) és M33 (Triangulum) galaxisok keresőtérképe

Charles Messier 1771-ben 45, majd 1781-ben 103 „ködös” objektumot bemutató katalógust közölt. A szerzőre utalva ezekre szokás azóta is M és sorszám megjelölésével hivatkozni. Ma már tudjuk, hogy a Messier féle diffúz ködök többsége Galaktikus, de 39 kívül esik a mi csillagrendszerünkön.

Sir Frederick William Herschel (*Friedrich Wilhelm Herschel*, 1738-1822) Caroline nővérével szisztematikus égboltfelmérést végzett. Az eredményeket a „*Construction of the Heavens*” (Herschel, 1785) című könyvében és katalógusokban foglalta össze. Rámutatott Galaxisunk lapult alakjára, valamint kb. 2500 ködöt is megfigyelt és osztályozott. Herschel korának legjobb távcső építője is volt. Mérései azért vezethettek jelentős, új eredményre, mert a nagyobb távcsövek használatával a korábbiakhoz képest nagyobb felbontást és érzékenységet ért el. A Herschel által definiált osztályok és egyedszámok: *fényes ködök* (I, 288db); *halvány ködök* (II, 910db); *igen halvány ködök* (III, 985db); *planetáris ködök* (IV, 78db); *igen nagy ködök* (V, 52db); *nagyon sűrű és gazdag csillaghalmazok* (VI, 42db); *elég sűrű és gazdag csillaghalmazok* (VII, 67db); és végül *meglehetősen szétszórt csillaghalmazok* (VIII, 88db). Herschel jegyzékében az objektumokat a következő formában szerepelteti: a kezdő H betű utáni római szám az illető objektum típusát adja meg, az ezt követő arab szám pedig, hogy ezen osztályon belül hányadik listabeli objektumról van szó. Munkáját fia, John Herschel folytatta, több mint 2000 ködöt észlelt, ezek negyedét újonnan felfedezve. A korábbiaknál pontosabb leírást adott az objektumokról, és 91 ábrával is szemléltette ezeket.

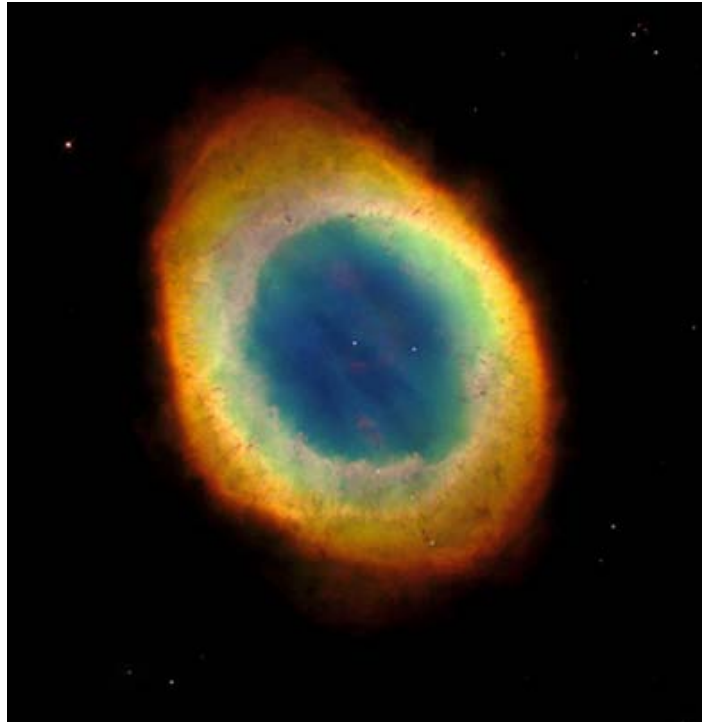


1.2. ábra: Illusztráció William Herschel felhő katalógusából

John Herschel folytatta 1864-ben jelentette meg a *General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars* (Herschel 1864), az 5079 objektumot felsoroló Általános Katalógust, melyet kezdőbetűivel GC-ként jelölnek. William Herschel a nebuláknak és halmazoknak a szomszédos csillagokhoz viszonyított helyzetét mérte. John Herschel a déli égbolton is végzett felmérést kiegészítve a katalógust, 1830.0-as epochára számított koordinátákat közölt meglepő látszólagos precizitással (ívmásodperc pontossággal), és rektaszenció szerint rendezte sorba ezeket. A koordinátákat Henrik Ludvig D'Arrest pontosította és újakat is észlelt. John Louis Emil Dreyer 7,840 objektumot foglalt össze A New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars (NGC, Új Általános Katalógus, Dreyer 1888). Dreyer több kiegészítést is publikált, az úgynevezett Index Katalógusokat („*Index Catalogue of Nebulae...*”, Dreyer 1895 és 1908), melyekre IC rövidítéssel hivatkozunk. Az NGC-ben felsorolt égitestek túlnyomó többségéről F. Zwicky és munkatársai derítették ki, hogy extragalaktikus rendszerek. A 19. évszázad tehát a ködök és csillaghalmazok pozíciójának és morfológiájának szisztematikus felméréseivel telt. A precíz koordináta meghatározások és a megismételt mérésektől remélni lehetett, hogy meghatározhatók lesznek a távolságok, illetve az objektumok fizikai tulajdonságai. Dreyer az általa áttekintett mérési jegyzőkönyvek alapján arra a következtetésre jutott, hogy számos „változó” köd létezik, melyek mind fényességüket, mind alakjukat változtatták az évtizedek során. Ez az elsősorban mérési pontatlanságok szülte „eredmény” viszont azt a helytelen általánosító feltételezést erősítette, hogy a ködök valójában igen közeli objektumok.

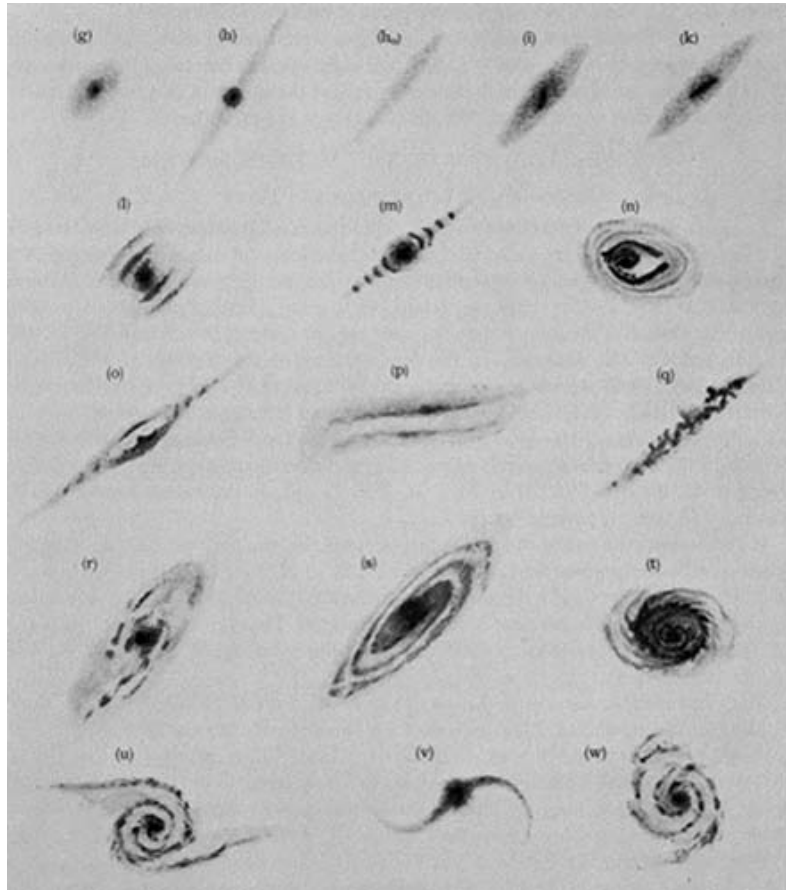
Ahogy William Herschel távcsövével vizsgálva az eget majdnem meghúszszorozta az ismert ködök és csillaghalmazok számát, a méréstechnika fejlődése a 19. század végén is minőségi változást hozott. A heidelbergi Maximilian Franz Joseph Cornelius Wolf is morfológiai elemzésekkel kezdte a ködök vizsgálatát. Több ezer az NGC-ben nem szereplő halvány objektumot azonosított. A mérésekhez nagylátószögű lencsés távcsövet és elsősorban a spektroszkópiai méréseihez egy tükrös távcsövet használt. Az általa talált objektumok adatait a

Königstuhlnebellisten (Königstuhl-i Ködjegyzékek, Wolf 1902 - 1928) néven ismertté vált jegyzékekben tette közzé. A ködök fajtáit spektroszkópai mérésekkel sikeresen különítette el.



1.3. ábra: Az M57 azaz a Gyűrűs-köd, egy planetáris köd a Lant csillagképben. Hubble Űrtávcső WFPC2 felvétel (The Hubble Heritage Team, AURA/STScI/NASA 1998)
http://hu.wikipedia.org/wiki/F%C3%A1jl:M57_The_Ring_Nebula.JPG A halvány fehér törpe csillagot az M57 közepében 1886-ban Gothard Jenő észlelte elsőként.

Wolf nem csak a planetáris ködök, reflexiós ködök, és a „spirálködök” közötti spektrális különbségeket mutatta ki, hanem egy-egy objektum részeinek spektrumában is talált eltéréseket (valójában elsősorban a hőmérséklet különbségek miatt). Az Androméda galaxis (M31) hosszú expozíciós idejű fotografikus felvételével és abszorpciós spektrum mérésével igazolta, hogy annak fénye zömében csillagoktól származik. Felfedezte a Coma galaxishalmazt. Bizonyította, hogy a fényes ködökben gyakran észlelt, és Herschel óta lyukaknak vélt sötét foltok valójában a fényes háttér előtti csillagközi felhők. Wolf a ködöket 23 osztályba sorolta, az osztályokat standardokként választott objektumokkal definiálta, és a-tól w-ig kisbetűvel jelölte, ezek közül néhányat az 1.4. ábra mutat be.



1.4. ábra: A Wolf-féle köd osztályok olyan reprezentánsai, melyek extragalaxisok lehetnek. Az itt nem bemutatott osztályok a-tól f-ig planetáris ködök (Wolf 1908).

A köd, vagy nebula elnevezés a 20. század elejéig használatos volt csillaghalmazokra, csillagközi felhőkre és extragalaxisokra egyaránt. A Tejút és a ködök egy elméletbe foglalása már a 18. században megtörtént. A Durham-i Thomas Wright „An original theory or new hypothesis of the Universe” (magyarul: Egy eredeti elmélet vagy az Univerzum új hipotézise) című könyvében (Wright 1750) a Tejutat, mint csillagok egy lapult rendszerét említi, melyet belülről figyelünk meg. Ezt az elméletet Immanuel Kant 1751-ben olvasta és az „Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels”-ben (magyarul: Általános természettörténet és a mennyek elmélete) át is vette. Ebben a rendszerben a távoli ködök is hasonló „Univerzumok”, csillagrendszerek lehetnek. Az elméletet igazolni, azaz a ködös objektumok távolságát és természetét mérésekre alapozva meghatározni csak a 20. század elején sikerült, ahogyan az a következő alfejezetben olvasható.



1.5. ábra: Az Owl-köd – ahogyan Lord Rosse nevezte (Parsons 1850), ez az objektum M97 néven is ismert planetáris köd, tehát nem galaxis.

1.2. Világmodellek – a Shapley-Curtis vita

Az 1920-körül Harlow Shapley és Heber D. Curtis között zajló tudományos vita legfontosabb kérdése a belátható világ mérete volt („the Scale of the Universe”), de számos „részkérdést” is jelentősként említhetünk. A vita azért

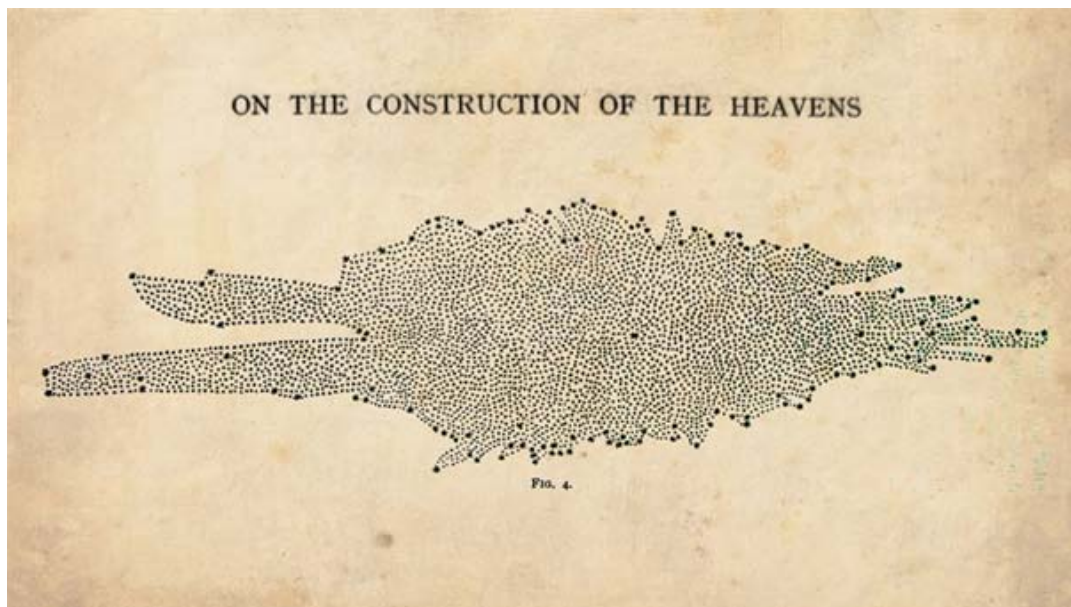
kerülhetett bele a tudománytörténetbe, mert Shapley és Curtis legfontosabb érveiket egy a nyilvánosság előtt tartott vitán ütköztethették (the Great Debate). Az Amerikai Egyesült Államok Tudományos Akadémiái Nemzeti Kutatási Tanácsa (National Research Council, NRC) szervezésében a 1920 április 20-án a Smithsonian Museum of Natural History előadójában az akadémia kutatói mellett vendégek (mint Albert Einstein) jelenlétében a Világegyetem szerkezetéről tartott előadások a saját elmélet alátámasztása mellett a konkurens modell hibáira igyekeztek rámutatni. Az NRC a vita összefoglalóját is megjelentette 1921-ben.

1.2.1. A Shapley-Curtis vita főbb kérdései:

- **Egy galaxis van, vagy galaxis szigetek sokasága (Island Universes)?** – Curtis úgy vélte, hogy az Univerzumot sok, a miénkhez hasonló galaxis alkotja, melyeket spirálködként tartottak számon. Shapley ugyanakkor ezeket Galaxisunk közeli gázfelhőinek tartotta.
- **Mekkora a mi galaxisunk, a Tejútrendszer?** – Abban az időben (1924 előtt) az Univerzumot Shapley még egyetlen óriási galaxisnak tekintette 100kpc körüli mérettel, míg Curtis majdnem egy nagyságrenddel kisebbnek.
- **Hol helyezkedik el a Nap a Galaxisban?** – Curtis szerint Galaxisunk centrumához közel, Shapley szerint attól távol.

1.2.2. A Shapley-Curtis vita tudományos előzményei és háttere:

Tekintsük át, hogy elméleteiket mire alapozták! A Világegyetem szerkezetére a prehisztórikus korok óta számos filozófiai elképzelés létezett, de az első szisztematikus égboltfelmérést William Herschel végezte nővérel, Caroline-nal. Az égboltot 1088 irányban negyed-negyed négyzetfokos részterületeken észlelte, és csillagszámlálást végzett. A csillagok eloszlásából modellt alkotott feltételezve, hogy azok mind hasonló fényességűek, csak a tőlünk mért távolságuk különbözik. Ezzel az adott irányokban a galaxis határának távolságát vélte meghatározni. Csillagközi fényelnyelést, szórást nem vett figyelembe, hiszen ezek a jelenségek a 18. században még nem voltak ismertek. Az eredmény egy 1:5 arányban lapult galaxis lett, melyben a Napot közel találjuk a középponthoz (lásd 1.6. ábra).



1.6. Ábra: Herschel modellje a Galaxisról – a Nap a geometriai középpont közelében (Herschel 1789).

A fenti egyenletet integrálva, és feltéve, hogy a csillagsűrűség állandó, fényelnyelés nélküli térben:

- $A(m)$ az egy négyzetfokra eső csillagok száma az $m \pm 1/2$ látszólagos magnitúdó-intervallumban;

- $N(m)$ az m látszólagos magnitúdónál fényesebb csillagok száma négyzetfokonként.

A köztük fennálló összefüggés:

$$dN(m) = A(m)dm \quad (1.1)$$

A fenti egyenletet integrálva megkapjuk az egyenletes csillagsűrűséget, fényelnyelés nélküli térben:

$$\log N(m) = 0,6m + \text{konstans} \quad (1.2)$$

A Herschel-féle lapult galaxis modellt a későbbi felmérések is megerősítették. A Jacobus Kapteyn-féle 206 db 1 négyzetfokos égi területre (un. „selected areas”, Kapteyn 1906) kiterjedő csillagszámlálás eredménye szerint a Tejútrendszer csillagait egy lapult, szimmetrikus korongban igen nagy távolságokig találjuk (lásd 1.6. ábra). A rendszer méretei: 17 kpc átmérő és 3 kpc vastagság a középponti vidéken (Kapteyn 1920).

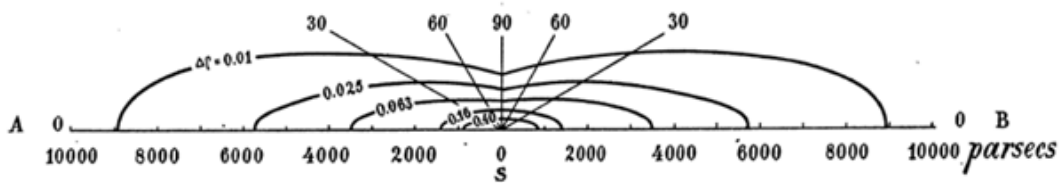
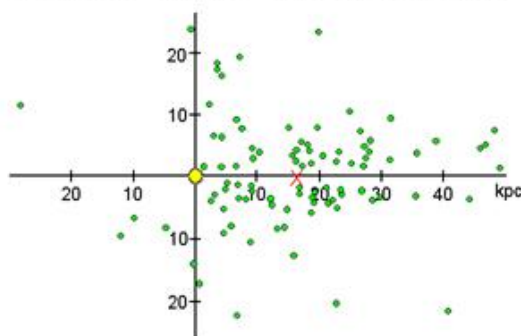


FIG. 2.—Distribution of density in a plane perpendicular to the galactic circle passing through the center of the stellar system. AB is the plane of the galaxy; the marginal numbers 0, 30, 60, and 90 are galactic latitudes. The curves are lines of equal density, the density at the sun (assumed to be at the center of the system) being taken as unity.

1.6. ábra: A Kapteyn-féle galaxis modell csillagsűrűség kontúrokkal. A Nap a modell szerint a középpontban van (Kapteyn 1920).

A képet árnyalták Harlow Shapley kutatásai. Shapley 1918-ban kalibrálta a periódus-fényesség relációt és ezután sorra határozta meg a gömbhalmazok távolságát a bennük felfedezett pulzáló változók fénygörbéi alapján. Shapley ekkor az RR Lyr és cefeida változó osztályokat még nem tudta megkülönböztetni, ezért a távolságértékek nem lehettek pontosak. (A cefeidának vélt RR Lyr változók luminositása kisebb, mint a cefeidáké, ezért Shapley túl nagy távolságokat kapott.) A gömbhalmazok egy kevésbé lapult rendszert mutattak, és a galaxis ötször nagyobbak látszott, mint Kapteyn-é. Shapley a gömbhalmazok megfigyelt eloszlása alapján felvázolt modelljében a Napot ennek az óriás galaxisnak a közepétől távol helyezte el (lásd 1.7. ábra).

Shapley's Globular Cluster Distribution



1.7. ábra: A gömbhalmazok eloszlása Shapley eredeti ábrája alapján (színezve). A Nap: kis sárga kör, a Tejútrendszer középpontja: piros X. A gömbhalmazok a középpont fele sűrűsödő eloszlást mutatnak, a Nap a középponttól távol. (Pogge, R.W., <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit4/milkyway.html>)

Curtis ugyanakkor Herschel és Kapteyn korábbi modelljeihez hasonlóan a Napot egy viszonylag kicsi Tejútrendszer közepébe tette, és ezen kívül számos hasonló galaxist feltételezett, amit mint a *sziget univerzumok* elméletét (Island

Universe Theory) már Immanuel Kantnál is olvashattunk. Mint ahogy már említettük, a csillagködök nagy távolságának ellentmondani látszott, hogy ezek mozgását vélték detektálni egyes kutatók. Ezekről a mérésekről csak később derült ki, hogy a leképezés hibáit, és nem valódi mozgásokat figyeltek meg. A spirális ködök extragalaktikus (Tejútrendszeren kívüli) létét nem csak sejtések, hanem több megfigyelés is alátámasztotta már a XX. század elején. Ezek helyes értelmezése azonban váratott magára. A spirálködökben számos megfigyelő észlelt olyan csillagokat, melyek rövid időre fényesebbek lettek, mint a köd maga. Ezeket a galaktikus nóva csillagokkal azonosnak gondolták, melyek abszolút fényessége -7, sőt -8 magnitúdó is lehet, és évente többet is látni belőlük felfényleni a Tejútrendszerben. (Ezek szoros kettős rendszerekben előforduló eruptív változók. Valójában összesen kb. 40 kitörés lehet évente a Galaxisban.) Az elnevezés Tycho Brahe-től származik, aki az 1572-ben a Cassiopeiában észlelt szupernóvát *De Stella Nova* (latin, „az új csillagról”) című közleményében írta le. Az egyik spirálködben észlelt „nóva” az S Andromedae (SN 1885A) elvileg szabad szemmel is látható volt 5.85 magnitúdó vizuális fényességével (de Vaucouleurs & Corwin 1985). George Willis Ritchey és Curtis a Mount Wilson és Lick Observatory Androméda galaxisról készített fotólemezein 15 nóvát találtak. Ezek egy homogén csoportot alkottak, viszont mind csak kb. $m_{pg}(\max) = 17$ fotografikus fényességet értek el, ami 10 magnitúdóval kisebb, mint az S And-é. Az S And viszont hasonlatosabb volt azokhoz a „nóvák”-hoz melyeket korábban más spirálködökben mértek és az azokat tartalmazó köddel összemérhető fényességet értek el felfényléskor.

A nóvák és szupernóvák megkülönböztetése is azt erősítette meg, hogy az M31 távolabb van, tehát nem egy köd a Tejútrendszerben, hanem a miénkhez hasonló galaxis. A Tejútrendszer méretét ma a Kapteyn-i ötszörösének gondoljuk, Shapleynek tehát ebben igaza volt. Bebizonyosodott az is, hogy a Nap valóban távol van a Tejútrendszer középpontjától, ha nem is annyira távol, mint amit Shapley 1918-ban kiszámolt. Ellenben Curtisnek lett igaza abban, hogy a spirális ködök a miénkhez hasonló galaxisok.

Referenciák és további olvasnivaló az előszó és az 1. fejezet témájában:

Balázs–Érdi–Marik–Szécsényi–Vízi, 1996: „*Bevezetés a csillagászatba.*” Kézirat, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.

Cserepes László, Petrovay Kristóf, 1993: „*Kozmikus fizika, Egyetemi jegyzet fizikushallgatók számára (Kézirat)*”, ELTE Természettudományi Kar, Budapest.

de Vaucouleurs, G.; Corwin, jr., H. G. 1985: „*S Andromedae 1885 - A centennial review*”. *Astrophysical Journal* 295: 287

Dreyer, D. L. E., 1888: „*A New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars, being the Catalogue of the late Sir John F. W. Herschel, Bart, revised, corrected, and enlarged*”, *Memoirs of the Royal Astronomical Society*, Vol. 49, p.1

Dreyer, J. L. E., 1895: „*Index Catalogue of Nebulae found in the years 1888 to 1894, with Notes and Corrections to the New General Catalogue*”. *Memoirs of the Royal Astronomical Society* 51: 185–228.
Bibcode:1895MmRAS..51..185D.

Dreyer, J. L. E., 1908: „*Second Index Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars; containing objects found in the years 1895 to 1907, with Notes and Corrections to the New General Catalogue and to the Index Catalogue for 1888–94*”. *Memoirs of the Royal Astronomical Society* 59: 105–198. Bibcode:1908MmRAS..59..105D.

Galilei, G., 1610: „*Siderius Nuncius*”, kiadó: Thomas Baglioni,
<http://www.rarebookroom.org/Control/galsid/index.html>

Herschel, W. (1786). "Catalogue of One Thousand new Nebulae and Clusters of Stars". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 76: 457–499. Bibcode:1786RSPT...76..457H. doi:10.1098/rstl.1786.0027.

Herschel, W. (1789). "Catalogue of a second Thousand of new Nebulae and Clusters of Stars; with a few introductory Remarks on the Construction of the Heavens". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 79: 212–255. Bibcode:1789RSPT...79..212H. doi:10.1098/rstl.1789.0021.

Herschel, W. (1802). „*Catalogue of 500 new Nebulae, nebulous Stars, planetary Nebulae, and Clusters of Stars; with Remarks on the Construction of the Heavens*”. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 92: 477–528. Bibcode:1802RSPT...92..477H. doi:10.1098/rstl.1802.0021.

Herschel, J. F. W (1864). „*Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars*”. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 154: 1–137. Bibcode:1864RSPT..154....1H. doi:10.1098/rstl.1864.0001.

Kant, I., 1755: „*Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*”, Zeitz, Bei W. Webel, 1798. Neue aufl.

Kapteyn J.C., 1906: „*Plan of Selected Areas*”, Groningen

Kapteyn J.C., 1908: „*Recent researches in the structure of the Universe*”, The Observatory, Vol. 31, p. 346-348

Kapteyn, J. C. & Van Rhijn, P. J., 1920: „*On the Distribution of the Stars in Space Especially in the High Galactic Latitudes*”, ApJ....52...23K

Kolláth, Z., 1997: „*Gallery of stellar pulsation / A csillagpulzáció galériája*”,
<http://www.konkoly.hu/staff/kollath/gallery.html>

Marik, M., 1989: „*Csillagászat*”, Budapest, Akadémiai kiadó

McLaughlin, D. B., 1922: „*The Present Position of the Island Universe Theory of Spiral Nebulae with Plate XXV (concluded)*”, Popular Astronomy, Vol. 30, p.327

Ritchey, G. W. 1917: „*Novae in Spiral Nebulae*”, PASP...29..210R

Ritchey, G. W. 1917: „*Another Faint Nova in the Andromeda Nebula*”, PASP...29..256R

Roberts, I. 1889: „*Photograph of the nebula M 51 Canum Venaticorum*”, MNRAS..49..389R

Roberts, I. 1888: „*Photographs of the nebulae M 31, h 44, and h 51 Andromedæ, and M 27 Vulpeculæ*”, MNRAS..49...65R

Shapley, H., 1919: „*On the Existence of External Galaxies*”, Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, Vol. 13, p.438

Shapley, H. & Duncan, J. C., 1919: „*Novae in the Andromeda Nebula*”, PASP...31..280S

Shapley, H. & Curtis 1921: „*The Scale of the Universe*”, Bulletin of the National Research Council, Vol. 2, Part 3, No. 11, p. 171-217, <http://ia600404.us.archive.org/11/items/scaleofuniverse00shap/scaleofuniverse00shap.pdf>

Shapley, H., 1922: „*Approximate Distance and dimensions of Large Magellanic Cloud*”, Harvard College Observatory Bulletin No. 775, pp.1-2

Trimble, V, 1995: „*The 1920 Shapley-Curtis Discussion: Background, Issues, and Aftermath*”, PASP.107.1133T, DOI: 10.1086/133671

Trümpler, R.J. 1930: „*Absorption of Light in the Galactic System*”, PASP, 42, 214

Wolf, M.F.J.C., 1902– 1928: „*Königstuhlnebellisten, I–XVI*”

Wolf, M.F.J.C., 1908: „*Spektren von Gasnebeln*”, Viertel jahrsschrift der Astronomischen Gesellschaft, 43, 208

SEDS, „*Nicolas Camille Flammarion*”, <http://messier.seds.org/xtra/Bios/flammarion.html>

She is an Astronomer „*Caroline Herschel*”, <http://www.sheisanastronomer.org/index.php/history/carolineherschel>

She is an Astronomer „*Henrietta Leavitt*”, <http://www.sheisanastronomer.org/index.php/history/henrietta-leavitt>

Szegedi Tudományegyetem, „*Csillagászat*”, <http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat.html>

The Interactive NGC Catalog Online <http://spider.seds.org/ngc/ngc.html>

Wikipedia: „*Henrietta Swan Leavitt*”, http://hu.wikipedia.org/wiki/Henrietta_Swan_Leavitt

Wikipedia: „*Charles Messier*”, http://hu.wikipedia.org/wiki/Charles_Messier

Wright, T. 1750: „*An original theory or new hypothesis of the Universe*”, Printed for the Author, and fold by H. Chapelle, in Grosvenor-Street.

2. fejezet - Távolságmérés és az extragalaxisok felfedezése

A csillagászati távolságmérési módszerek, köztük a cefeida parallaxis tárgyalása után megmutatjuk hogyan igazolta Hubble az extragalaxisok létét.

2.1. Trigonometrikus parallaxis, a parszek definíciója

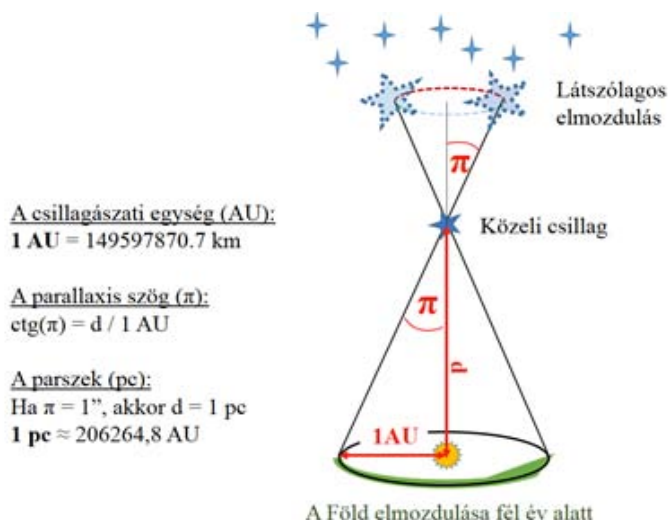
A távolság ismerete nem csak a csillagászati objektumok térbeli elhelyezkedésének, vagy szerkezetének leírásához szükséges, de olyan alapvető fizikai paraméterek meghatározásához is, mint a tömeg, vagy a sugárzási teljesítmény. A fejezet elején fontos definíciók megadása közben áttekintünk néhány alapvető csillagászati távolság meghatározási módszert, melyek a Tejútrendszeren belül használatosak (lásd még „A Tejútrendszer szerkezete” jegyzetben), majd részletesebben ismertetünk extragalaktikus objektumokra (is) alkalmazhatóakat.

A trigonometrikus parallaxis lényege, hogy a megfigyelő egy ismert bázistávolságot elmozdulva két különböző pozícióból méri meg egy objektum irányát. (A *παράλλαξις* görög szó, jelentése megváltozás.) Az objektum távolságát ezután ki tudja számítani a bázistávolságból, és az irányok közti szögeltérésből, mely nagyobb kell legyen, mint az adott eszközrendszerrel mérhető legkisebb szög. Ez a mérési pontosság adja a módszer alkalmazhatósági korlátját is.

Föld forgásából adódó *napi parallaxis* jelenségében a Föld átmérője adja a bázistávolságot. Két megfigyelést végezve a Naprendszer objektumaira a távoli csillagokhoz képest különböző irányokat fogunk kapni (lásd 2.1. ábra). A közeli csillagok távolságát az *évi parallaxis* segítségével határozzuk meg. A Föld keringése miatt egy év alatt a nem túl távoli csillagok látszólag egy ellipszisen mozognak el. Ez a parallaxikus ellipszis lehet elfajult is (szakasz, ha a csillag az Ekliptika síkjában van).

$$\frac{d}{1AU} = \text{ctg}(\pi) \quad (2.1)$$

A csillagok távolságára használt hossz mértékegység definíciójának alapja is az évi parallaxis. Az 1 parsec az a távolság, ahonnan az 1 AU hosszúságú szakasz (1 csillagászati egység, a Föld pályájának fél nagytengelye) merőleges rálátás esetén 1 ívmásodperc szög alatt látszik. A parszek (parsec) SI mértékegység, a csillagászati egységgel definiáljuk, de kifejezhetjük méterben, vagy fényévben is: $1 \text{ pc} = \text{ctg}(1'') \text{ AU} \approx 206264,8 \text{ AU}$, $1 \text{ pc} \approx 3.08567758 \times 10^{16} \text{ m}$, $1 \text{ pc} \approx 3,2617 \text{ fényév}$. A parszek jó mértékegység a közeli csillagok távolságára, de a galaktikus és extragalaktikus távolságok ennek ezer, illetve milliószorosa használatát igénylik (kpc, Mpc).



2.1. ábra: Az évi parallaxis és a parszek definiálása

Egy interaktív animáció az évi parallaxis szög távolságfüggéséről, és a parallaktikus ellipsziszről (Kövári): http://www.konkoly.hu/~kovari/CSILLAGASZAT/tananyag/CSILLAGASZAT/04_02.html

2.2. A fotometriai (radiometriai) parallaxis módszerekről

A távolságmérési módszereket általában „parallaxisként” említi a csillagászat. A fotometriai módszerek az égitestek látszó és abszolút fényessége (lásd Cserepes & Petrovay 2002) közötti különbség megállapításán alapulnak. Általánosítva, az adott spektrális tartományban az objektumból mérhető fluxus a következő 3 tényezőtől függ:

- az égitest sugárzási teljesítményétől, azaz az az adott hullámhossztartományban időegység alatt kisugárzott elektromágneses energiától,
- az égitest távolságától,
- annak a közegnek az adott spektrális tartományban mutatott elnyelésétől, melyen keresztül az égitest sugárzása hozzánk eljut.

Míg az ultraibolya, a távoli infravörös és rádió tartományban fluxust, a látható és közeli infravörös tartományban hagyományosan magnitúdó skálát használunk. Az objektumok M abszolút fényessége, és m_{obs} látszó fényessége különbségeként bevezetjük az $m_{obs} - M$ távolságmodulust. Az abszolút fényesség definíciójából következik, hogy:

$$m_{obs} - M = -5 + 5 \log d + A \quad (2.2)$$

Az A extinkció ismeretében kapjuk az m_{corr} fényelnyelésre korrigált látszólagos fényrendet:

$$m_{corr} = m_{obs} - A \approx m_{obs} - \alpha \left[\frac{d}{1 \text{ kpc}} \right] \quad (2.3)$$

feltéve, hogy az extinkciót okozó közeg lényegében homogén, és az extinkció kifejezhető az α 1 kpc-re jutó interstelláris fényelnyelés és a d távolság szorzataként.

A fotometriai távolságmérési módszerek lényegében az abszolút fényesség különböző meghatározási módjait jelentik, azután pedig a mért látszó fényességgel a távolsági modulust kiszámítva a problémát a (2.2) egyenletre vezetjük vissza. A fotometriai távolságmérési módszerek a csillag, vagy más sugárzó objektum egy-egy fizikai paraméterét kapcsolják a luminozitásához (vagy abszolút fényességéhez). Az objektum lehet egy csillag,

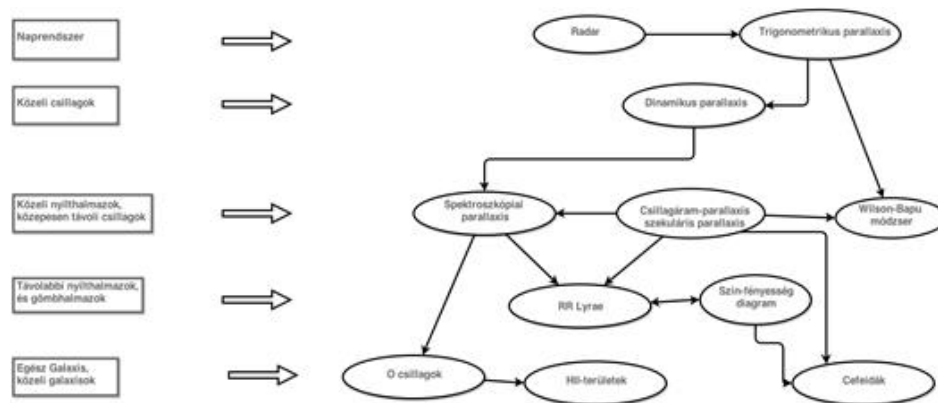
csillaghalmaz, vagy galaxis. A fizikai paramétereket asztrofizikai modellek, vagy csak megfigyelési tapasztalat alapján valamely spektrális paraméter, és/vagy esetleg az objektum fényváltozásának időbeli lefutása (fénygörbéje) mérésével határozzuk meg. A távolságmérési módszereket kalibrálni kell. Ehhez a trigonometriai parallaxistól kiindulva egyre nagyobb távolságig érvényes módszereket „illesztünk” egymáshoz.

2.3. Távolságmérési módszerek fajtái és hatókörük

A távolságmérési (parallaxis) módszereket három nagyobb csoportba sorolhatjuk:

- geometriai,
- fotometriai (radiometriai) és
- „egyéb” módszerek (minden, ami a fenti két csoportba nem illeszthető be).

Ezekről a szakirodalomban több jó összefoglalót is találunk (lásd a fejezet végén). Itt csak néhány módszert említünk.



2.2. ábra: A Tejútrendszeren belül alkalmazható távolságmérési módszerek.

Néhány galaktikus és extragalaktikus távolságmérési módszer hatóköre:

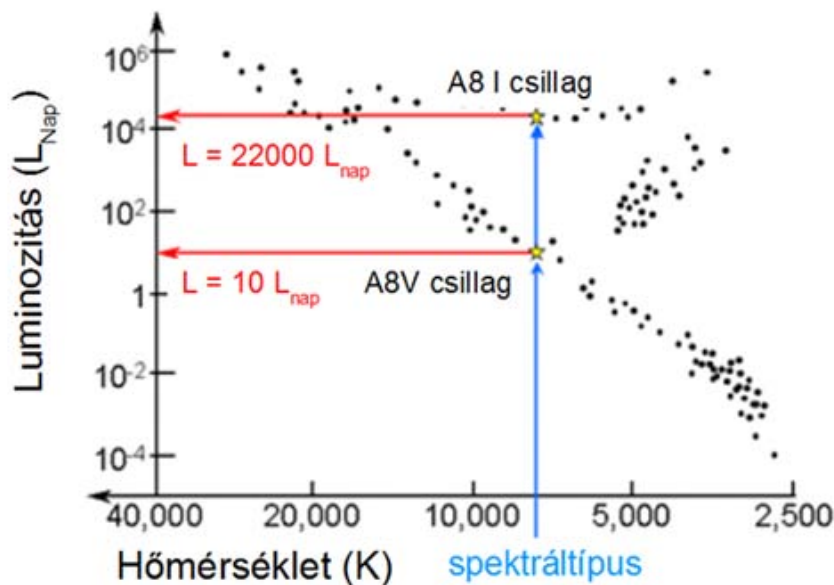
- Trigonometrikus parallaxis: 100 pc
- Csillagáram parallaxis: 100 pc
- Halmaz fősorozatának illesztése: 10 kpc
- RR Lyra változók: néhány száz kpc
- Nova csillagok: 1 Mpc
- Cefeidák: 30 Mpc;
- Tully-Fisher reláció: 150 Mpc;
- Felületi fényesség fluktuációk: 100 Mpc;
- Ia típusú szupernóvák: 500 Mpc;

2.4. Spektroszkópai parallaxis

A szín-abszolút fényesség diagramot Ejnar Hertzsprung, Hans Rosenberg és Henry Norris Russell alkotta meg a Hyadok, Pleiadok és más közeli halmazok csillagai tulajdonságainak összevetése egyik eszközeként a 20. század elején (Hertzsprung 1909, Rosenberg 1910, Russel 1914). Meghatározták az ismert távolságú halmazok csillagainak abszolút fényességét, és spektrumuk alapján színképosztályukat illetve felszíni hőmérsékletüket. Ezután a szín függvényében ábrázolva az abszolút fényességet, a csillagoknak megfelelő pontok jól körülhatárolt sávok mentén helyezkedtek el. A grafikon a korai munkák alapján lett HRD (Hertzsprung–Russell diagram), habár az első szín fényesség diagramot Rosenberg 1910-es publikációjában találjuk. A HRD vízszintes tengelyén színindexet (leggyakrabban B-V), vagy spektráltípust, vagy felszíni hőmérsékletet, a függőlegesen abszolút fényességet, vagy luminozitást (általában napluminozitás egységben) találunk.

A HRD a közepes és késői színképtípusokra többértékű. Ahogyan azt már a 20. század elején felismerték, a csillag színképe a felszíni hőmérséklet és a kémiai összetétel mellett függ a fotoszféra és kromoszféra sűrűségétől is. A nagy luminozitású vörösóriás csillagok légkörében a gravitációs gyorsulás kisebb, mint az ugyanolyan színű fősorozati csillagokéban. Ezért a fősorozati csillagok légkörében a nyomás nagyobb, ami eredményeként a fősorozati csillagok spektrumvonalai szélesebbek lesznek. A spektrumból tehát a luminozitási osztály is meghatározható.

A spektroszkópai parallaxis során a csillag spektrumából spektráltípusát és luminozitási osztályát, abból a HRD segítségével a csillag luminozitását, illetve az ezzel ekvivalens abszolút fényességét határozzuk meg (lásd 2.3. ábra). Fontos, hogy eközben az extinkcióra is korrigálunk. Ekkor a megismert látszó magnitúdó és abszolút magnitúdó, valamint extinkció (2.2)-be helyettesítve adja a távolságot. Ez tehát a fotometriai parallaxismérési módszerek csoportjába tartozik. A spektroszkópai parallaxismérés hatótávolsága az abszolút magnitúdó függvénye (pl. A0V típusú csillagokra kb. 2000 pc), relatív hibája - a távolságtól és színképtípustól függően 20-60%.



2.3. ábra: A spektroszkópai parallaxis során a csillag spektrumából spektráltípusát és luminozitási osztályát, abból a HRD segítségével a csillag luminozitását, illetve az ezzel ekvivalens abszolút fényességét határozzuk meg.

2.5. A Tully-Fisher reláció

Brent Tully és Richard Fisher galaxisok HI 21cm-es és optikai méréseit vetette össze. A HI spektrumvonalát, ahogyan általában a rádió spektrum vonalakat a maximális intenzitással, a vonal sebességével, a vonal alatti területtel, illetve a vonalprofil szélességével lehet jellemezni. A vonal sebessége megegyezik azzal a Doppler-sebességgel, amivel a vonal megfigyelt hullámhossza és laborban mérhető hullámhossza közti eltérést magyarázni lehetett. A sebességet korrigálják a Föld mozgásaira (keringés és forgás) és a Nap mozgására a Helyi Nyugalmi Rendszerhez (Local Standard of Rest, LSR) képest.

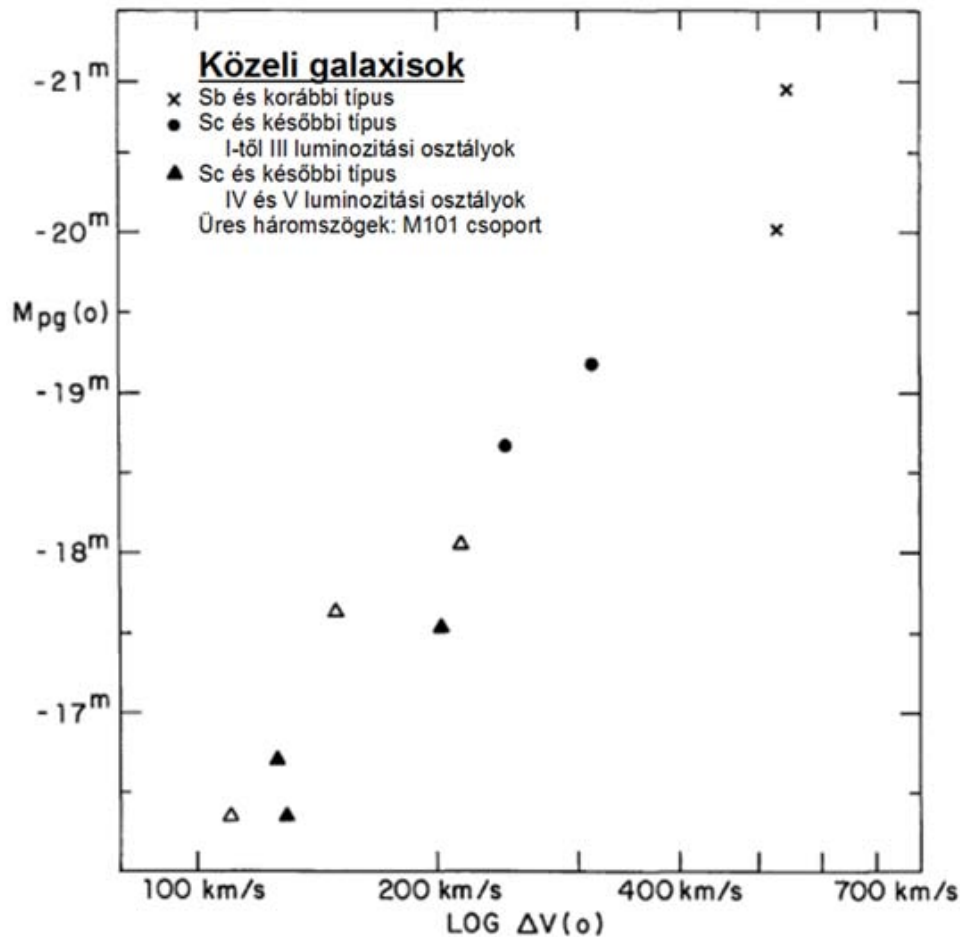
$$v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda} - v_{Föld} - v_{Nap} \quad (2.5)$$

A vonalprofil teljes szélességét a maximum 50%-nál mérve az un. félértékszélességet kapjuk (W_{50}). Szokás volt még a maximum 20%-ánál is felvenni a profil szélességét (W_{20}). A vonalszélesség megállapításánál figyelembe kell venni a véges spektrális felbontásunk miatt fellépő vonal kiszélesedést, és erre korrigálni kell.

Tully és Fisher megállapították, hogy az integrális HI 21cm-es spektrumvonal annál nagyobb félértékszélességű volt, minél nagyobb volt az adott galaxis integrált luminozitása. A Δv félértékszélesség logaritmusával és az L luminozitás közötti lineáris korreláció olyan jónak mutatkozott, hogy azt távolság meghatározási módszerként javasolták (Tully & Fisher 1977, lásd 2.3 ábra).

$$L = c \Delta v^{2.5 \pm 0.3} \quad (2.6)$$

Hasonlóan a galaxis látszó méretéből és távolságából számított átmérő is korrelált a félértékszélesség logaritmusával. A tapasztalati törvény szerint elég egy extragalaxis látszó magnitúdóját meghatározni és integrális HI profilját felvenni, ekkor a HI profil félérték-szélességéből a Tully-Fisher relációt felhasználva abszolút magnitúdót határozhatunk meg. Ez a látszó magnitúdó ismeretében a távolsághoz vezet el.

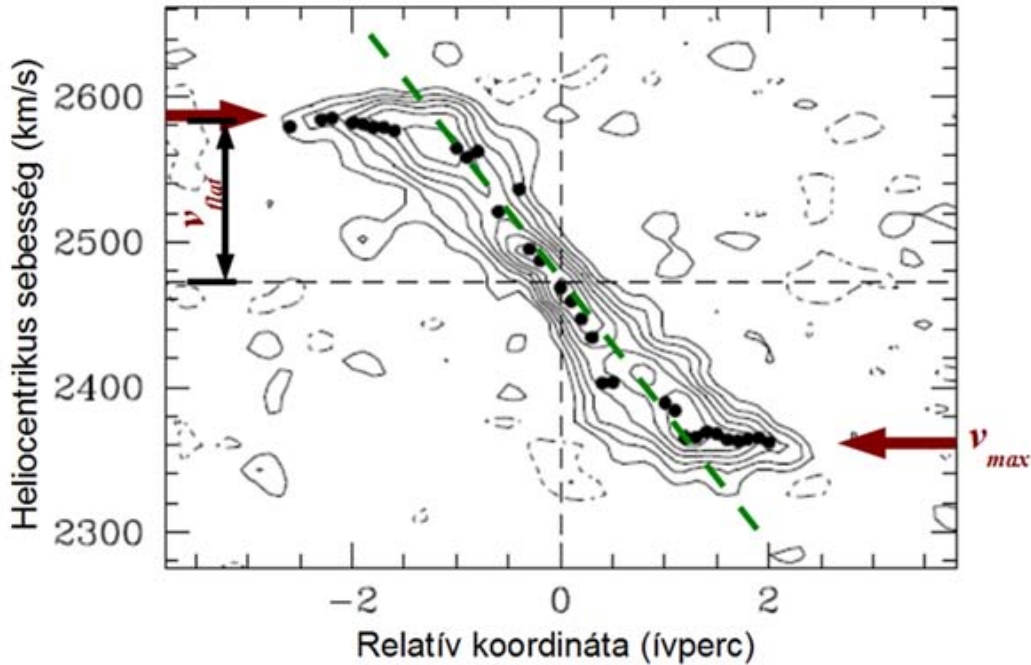


2.4. ábra: A Tully-Fisher reláció: a galaxis integrált HI 21cm-es spektrumvonalának félérték-szélessége és az abszolút fotografikus magnitúdó között lineáris korreláció van a Lokális Csoport, az M81-es csoport és az M101-es csoport galaxisait vizsgálva (Tully & Fisher 1977, Fig. 1 alapján).

A HI vonal Δv kiszélesedését alapvetően a v_{\max} maximális rotációs sebesség, a v_{turb} látóirányban mutatkozó turbulens mozgások határozzák meg:

$$\Delta v = 2(v_{\text{max}} \sin(i) + v_{\text{turb}}) \quad (2.7)$$

Szokás a v_{turb} komponensbe beleértetni az összes a nem keringést jelentő szisztematikus mozgást, ami kiszélesedést okoz.



2.5. ábra: Az NGC 514 spirálgalaxis sebesség-eloszlása. Egy úgynevezett pozíció-sebesség térkép a hidrogén 21cm-es spektrumvonala mérése alapján. A korong középvonala mentén felvett relatív koordináta függvényében ábrázoljuk a HI 21cm-es vonal alatti területét a különböző sebességek kis környezetében integrálva. A középvonal mentén átlagolt sebesség adja a rotációs görbét, ami a nukleustól távolodva előbb lineáris növekedést mutat, majd pedig konstans lesz (fekete köröcskék). A vízszintes nyilak mutatják a reprezentatív sebesség meghatározását, $v_{\text{max}}=197\text{km/s}$ (Rhee & Broeils 2005).

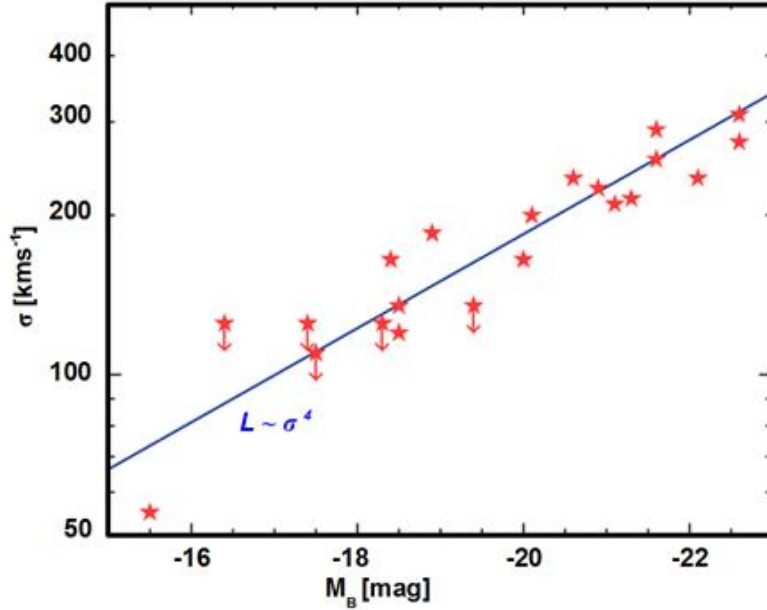
2.6. A Faber-Jackson reláció

A luminozitás és a csillagok sebességszórása közötti összefüggést Minkovski már 1962-ben felvetette, de a fotografikus abszolút fényesség és a sebesség szórása között nem talált jó lineáris korrelációt. S. M. Faber és Robert E. Jackson 25 elliptikus és lentikuláris galaxis spektroszkópiai megfigyeléséből és modelljeik szerint a magnézium b és a nátrium D vonalának (lásd Függelék) kiszélesedéséből meghatározták a galaxisok csillagainak σ látóirányú sebesség szórását. Az MB B sávú abszolút fényesség és σ között a következő összefüggést kapták (Faber & Jackson 1976):

$$\log \sigma = -aM_B + b \quad (2.8)$$

$$\sigma^4 \sim L$$

a 2.6. ábra illesztett egyenese szerint (2.9)



2.6. ábra: A csillagok sebesség-diszperziója logaritmusos skálán az abszolút fényesség függvényében elliptikus galaxisokra (Faber & Jackson 1976 alapján)

Minkowskit követve a csillagok \mathbf{vr} radiális sebességének Φ eloszlását kapcsolhatjuk a megfigyelhető spektrum diszperziójához. Két feltételezést teszünk:

- (1) a galaxis (luminozitással súlyozott) átlagos spektruma szintetizálható egyetlen csillag (esetünkben K óriás) spektrumából, mint sablonból (template spectrum).
- (2) a csillagok látóirányú σ diszperziójú sebességeloszlását Gauss-függvény írja le:

$$\Phi(v_r)dv_r = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma} e^{-v_r^2/2\sigma^2} dv_r \quad (2.10)$$

Ezután sablon spektrumvonalat eltoljuk a galaxis radiális sebességének megfelelően az észlelt vonal pozíciójáig. Ezután a csillag spektrumára alkalmazzuk a σ diszperziót. A konvolúció eredményeképpen állítjuk elő az eredeti σ_I diszperzió helyett a mértet:

$$\sigma_{\text{mért}} = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_1^2} \quad \text{ahol } \sigma_1 \text{ a csillag spektrum diszperziója (2.11)}$$

S. M. Faber és Robert E. Jackson 25 elliptikus és lentikuláris galaxis spektroszkópiai megfigyeléséből és modelljeik szerint a magnézium b és a nátrium D vonalának (lásd Függelék) kiszélesedéséből meghatározták a galaxisok csillagainak σ látóirányú sebesség diszperzióját. Az M_B B sávú abszolút fényesség és σ között a következő összefüggést kapták:

2.6.1. A D- σ reláció

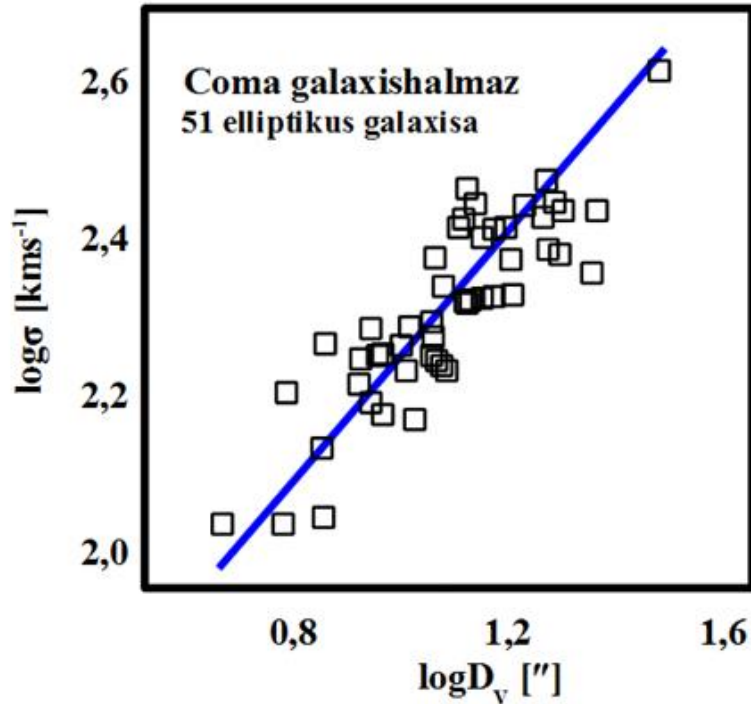
A tapasztalati D- σ reláció, az elliptikus galaxisok látszó szögátmérője és sebesség diszperziója között teremt kapcsolatot. Alan Dressler (Dressler et al. 1987) a Virgo és Coma halmazok vizsgálatánál a Faber-Jackson relációénál kisebb szórású lineáris korrelációt kapott, ha (2.11) helyett a képletben az R_e effektív sugárnál vett μ_e effektív felületi fényességet is szerepeltette a következőképp:

$$L \sim \sigma^{8/3} \mu_e^{-3/5} \quad (2.12)$$

$$R_e \sim \sigma^{1,325} \mu_e^{-0,825} \quad (2.13)$$

Bevezetett egy új paramétert, a μ felületi fényességet befoglaló D átmérőt, és megmutatta, hogy a D - σ reláció használható a relatív távolság meghatározására. A módszerük szerint a D - σ relációt mérésből egy ismert és egy ismeretlen galaxishalmazra megállapítva ezek távolságarányát származtathatjuk.

A látszó méret ebben az esetben a galaxis szögátmérőjét a $\mu_B = 20.75 \text{ mag}/\square''$. felületi fényesség kontúrjánál számítjuk. Ez a felületi fényesség független az aktuális távolságtól.



2.7. ábra: A D - σ reláció Coma galaxishalmaz 51 elliptikus galaxisára. Az illesztett egyenes meredeksége 1,2. (Lucey et al. 1991 alapján)

Lucey et al. (1991) alapján a D - σ reláció a Coma galaxishalmazra:

$$\log(D_V / 1'') = 1,68 + 1,2 \log(\sigma / 1 \text{ km s}^{-1}) \quad (2.14)$$

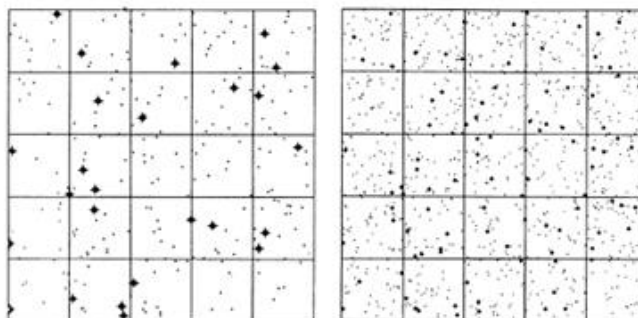
A (2.14) összefüggéstől csak $6 \pm 9\%$ eltérést találtak, mely magyarázható azzal, ha a galaxishalmaz külső elliptikus galaxisai kicsit nagyobb átmérőjűek ugyanakkora sebességszórás mellett.

Ez alapja lehet egy a Tully-Fisher relációnál is hatékonyabban használható távolság meghatározási módszernek, ha megfelelően kalibráljuk.

2.7. Távolságmérés felületi fényesség fluktuációjából

Egy r távolságra lévő elliptikus galaxis F fluxusa r^{-2} -gyel arányos, miközben a CCD egy detektorpixelére eső csillagok száma, r^2 -tel arányos. Ezért az egy pixelre jutó teljes fluxus (az egy csillagra eső fluxus és a csillagszám szorzata) független lesz az elliptikus galaxis távolságától. De van egy alapvető különbség egy közeli és egy távoli

elliptikus galaxis ugyanazon távcső detektor rendszerrel leképezett képei között: a felbontás. A távolabbi elliptikus galaxis képén kisebb felületi fényesség fluktuációt (surface brightness fluctuations, SBF) mérhetünk. A módszer alkalmazása nagy csillagsűrűséget feltételez, amit elliptikus galaxisok mellett spirálgalaxisok bulge-ában van jelen.

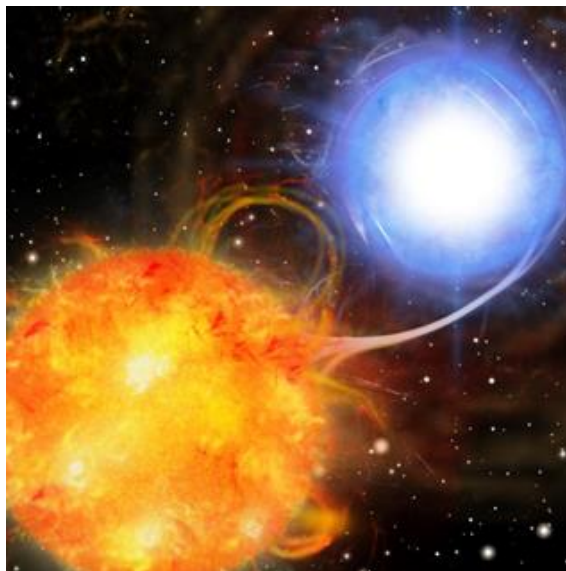


2.8. ábra: Közeli (bal) és távoli (jobb) galaxis képén kisebb fluktuáció látszik, a csillagok halványabbak, te több esik belőlük egy pixelre. <http://www.astro.rug.nl/~etolstoy/ACTUEELONDERZOEK/JAAR2005/pieter/distance.html>

A módszer gyengesége, hogy csak elliptikus galaxisokra, illetve a nagy bulge-dzsál rendelkező spirálgalaxisokra alkalmazható. Cefeidákkal tehát nehéz kalibrálni ezt a módszert, mert cefeidákat spirálgalaxisokban találunk. Galaxishalmazokban alkalmazzuk, feltéve, hogy a halmaz elliptikus és spirálgalaxisai nagyjából azonos távolságban vannak. Fontos, hogy az előtér csillagok járulékát levonjuk a képről, mert ez a „szennyezés” megnöveli a fluktuációt. Még 100Mpc-en túl is alkalmazható.

2.8. Ia típusú szupernóvák és távolságmérés

Amikor egy szoros kettős rendszerben a kezdeti tömegek különbözősége miatt a nagyobb kezdeti tömegű csillag már egy szén-oxigén magvú fehér törpe és kísérője vörös óriás állapotba kerül, akkor a csillagok között tömegátadás indulhat meg. Ha a vörös óriás felfúvódva kitölti az úgynevezett *Roche-lobe*-jét (ekvipotenciális felület a két csillag körül), akkor anyaga átáramlik a fehér törpe köré (lásd 8.9. ábra). Az átáramló anyag egy akkréciós korongra, onnan pedig a fehér törpe felszínére kerül.

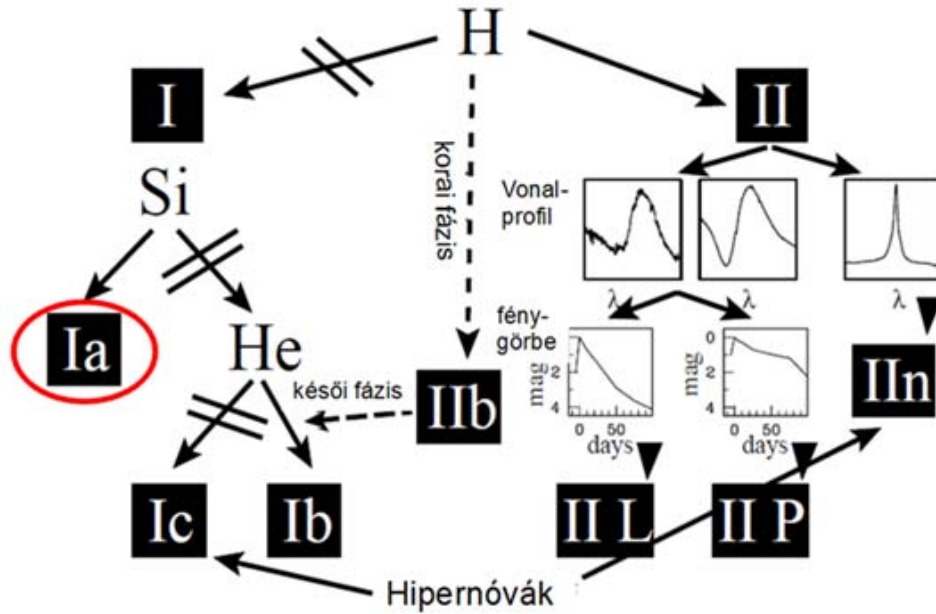


2.9. ábra: Tömegátadás szoros kettős rendszerben. A vörös óriás felfúvódva kitölti Roche-lobe-ját és anyaga átáramlik a fehér törpe köré. Az átáramló anyag egy akkréciós korongra, onnan pedig a fehér törpe felszínére kerül. (STScI 2013, <http://www.stsci.edu/~inr/thisweek1/thisweek/Nova.jpg>)

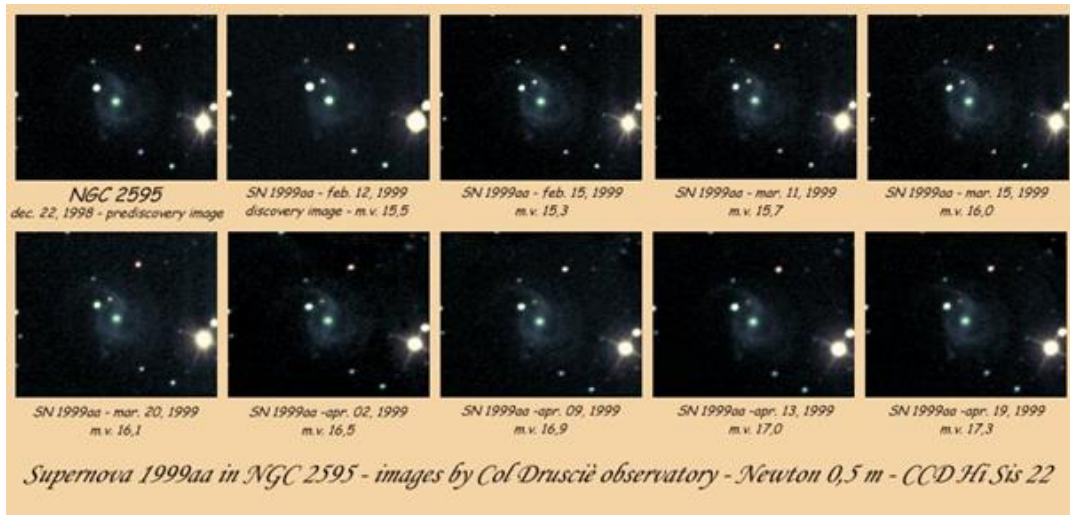
Megfelelően hosszú tömegátadás során a fehér törpe tömege túllépi a Chandrasekhar-féle határt (szén-oxigén magnál kb. $1,44 M_{\odot}$). Ekkor a fehér törpe összeroppan, belsejében beindul a szén és az oxigén fúziója. Mivel az

elfajult állapotú anyag nyomása nem függ a hőmérséklettől, a fúziós energiatermelés teljes egészében a fúziós ráta növelésére fordítódik, ezért a reakció a fehér törpe teljes nukleáris felrobbanásához vezet. Ezért az Ia típusú szupernóvákat szokás termonukleáris szupernóváknak is nevezni.

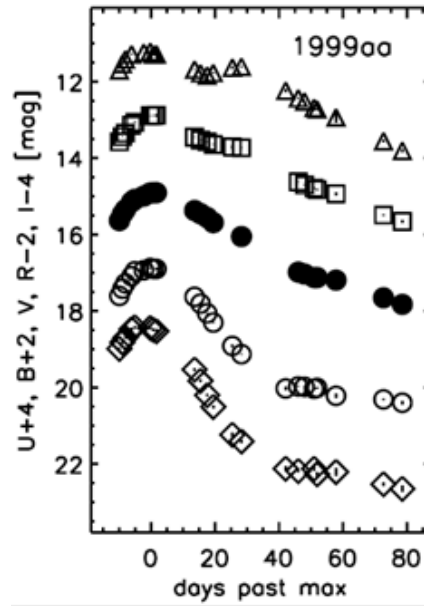
Az első Tejútrendszeren kívül felfedezett szupernóva is SN Ia típusú volt, az 1885-ben az Andromeda galaxisban megfigyelt S Andromedae (vagy a szokásos jelöléssel: SN 1885A).



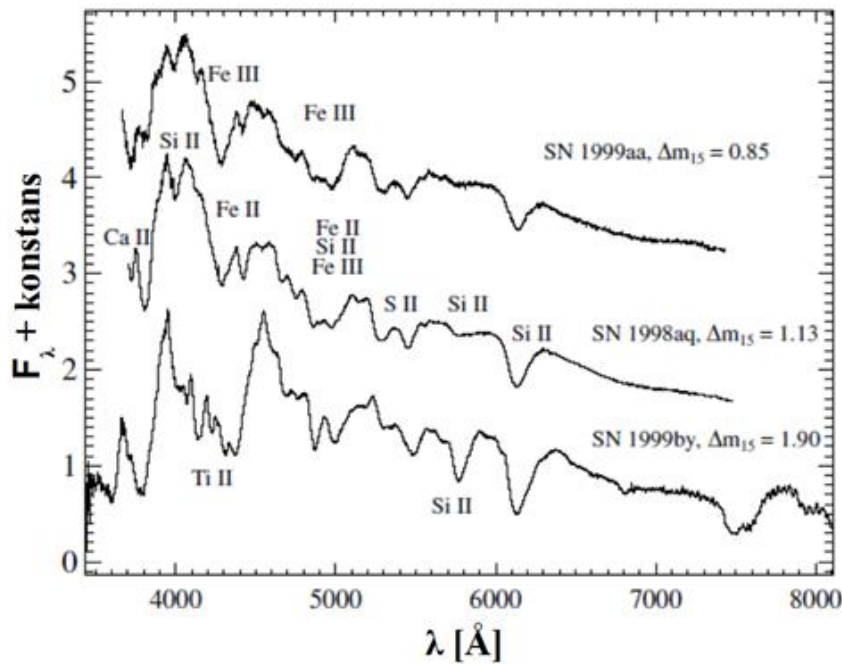
2.10. ábra: Szupernóva fajták és megkülönböztetésük (Cappellaro & Turatto 2001)



2.11. ábra: Az SN 1999aa SN Ia típusú szupernóva felfénylése és elhalványulása az NGC 2595 Sc típusú galaxisban (<http://www.rochesterastronomy.org/snimages/imgindex.html>).



2.12. ábra: Az SN1999aa Ia típusú szupernóva fénygörbéje U, B, V, R és I sávban a B maximum időpontjához viszonyított időpontokban (Jha et al. 2006).

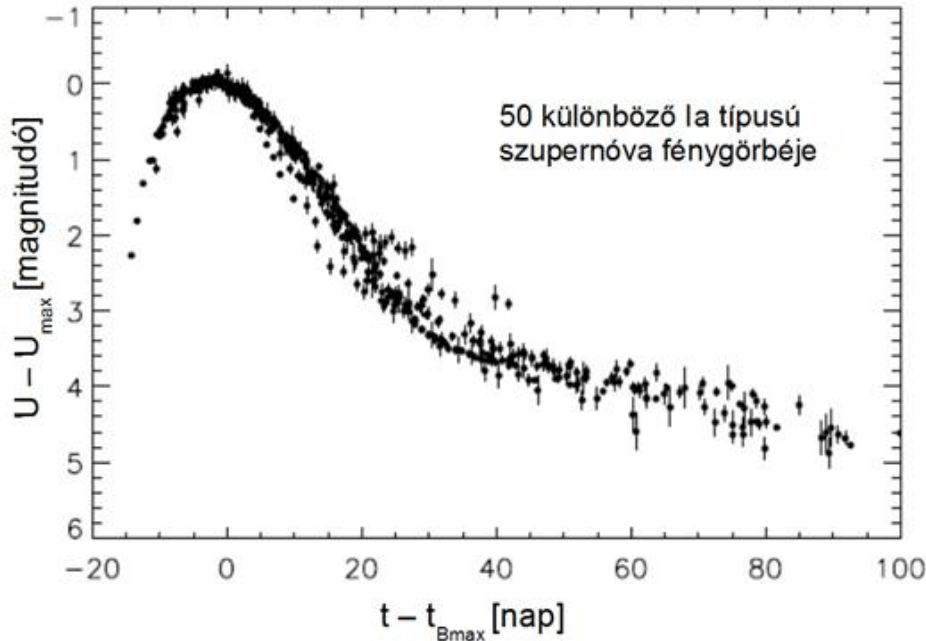


2.13. ábra: Ia típusú szupernóvák spektruma 1 nappal a maximum után. A fluxusokat a nyugalmi rendszerbe transzformált hullámhossz függvényében ábrázoljuk. A görbéket konstans fluxussal toltuk egymáshoz képest (Matheson et al. 2008). Lásd még: http://en.wikipedia.org/wiki/File:SN1998aq_max_spectra.svg

Az Ia típusú szupernóvák fényesek, abszolút fényességük $M_B < -16$. Spektrumuk jellegzetes, az egyszerűen ionizált szilícium (Si II) vonalai látszanak, de nincsenek benne hidrogén vonalak (lásd 2.13. ábra).

Az SN Ia-k extinkcióra és vöröseltolódásra korrigált abszolút fényessége jelentős szórást mutat, a B; V; ill. I sávban rendre kb. 0,8; 0,6; ill. 0,5 magnitúdót. Phillips (1993) szerint ugyanakkor a maximális fényesség és a fényesség csökkenési rátája nem független. Lényegében a fénygörbe alakját jellemzi, hogy a maximum utáni 15. napra a szupernóva fényessége hány magnitúdót növekedett. Ez a $\Delta m_{15}(B)$ fényességcsökkenés Phillips (1993) szerint

egyenesen arányos az SN Ia abszolút fényességével. A fénygörbe alak szerint korrigált maximális fényesség értékek szórása már kicsi $M_B = -19.3 \pm 0.12$ (lásd például Leibundgut 2001). Ezzel a korrekcióval már elég homogén „standard gyertyák”, ráadásul mindenféle galaxisban előfordulnak, ezért jó távolság indikátorok. A különböző fotometriai sávokban mért fénygörbékre a 2.11., 2.12 és 2.14. ábrákon adunk példákat.



2.14. ábra: 50 különböző Ia típusú szupernóva fénygörbéi egy egyesített ábrában. A maximum kb. 0.15 magnitudó szórást mutat. (Jha et al. 2006)

Az SN Ia jelenség fényességének alakulását az 1.44 naptömegnyi, elfajult, C-O összetételű fehér törpe csillagban magfúzió során keletkező 0.5-0.8 naptömegnyi radioaktív ^{56}Ni , ^{56}Co majd ^{56}Fe magokká történő bomlása során felszabaduló gamma fotonok határozzák meg. Az Ia típusú robbanáskor felszabaduló energia nagyjából 10^{44}J (10^{51} erg). Összehasonlításképpen egy a Tejútrendszerhez hasonló spirálgalaxis teljes luminozitása 10^{37}J , egy ultrafényes infravörös galaxisé (ULIRG) elérheti a 10^{39}J -t. és így közel százszor fényesebb, mint a befogadó galaxis fényessége. A robbanó objektum mindig nagyjából ugyanolyan tömegű és összetételű, ezért a robbanás jellemzői is hasonlóak. A távolságtörvény magnitúdóban kifejezett alakja, ha a d_L távolságot Mpc-ben mérjük:

$$m_\lambda - M_\lambda = 25 + 5 \log_{10} d_L + A_\lambda + K(\lambda), \quad (2.15)$$

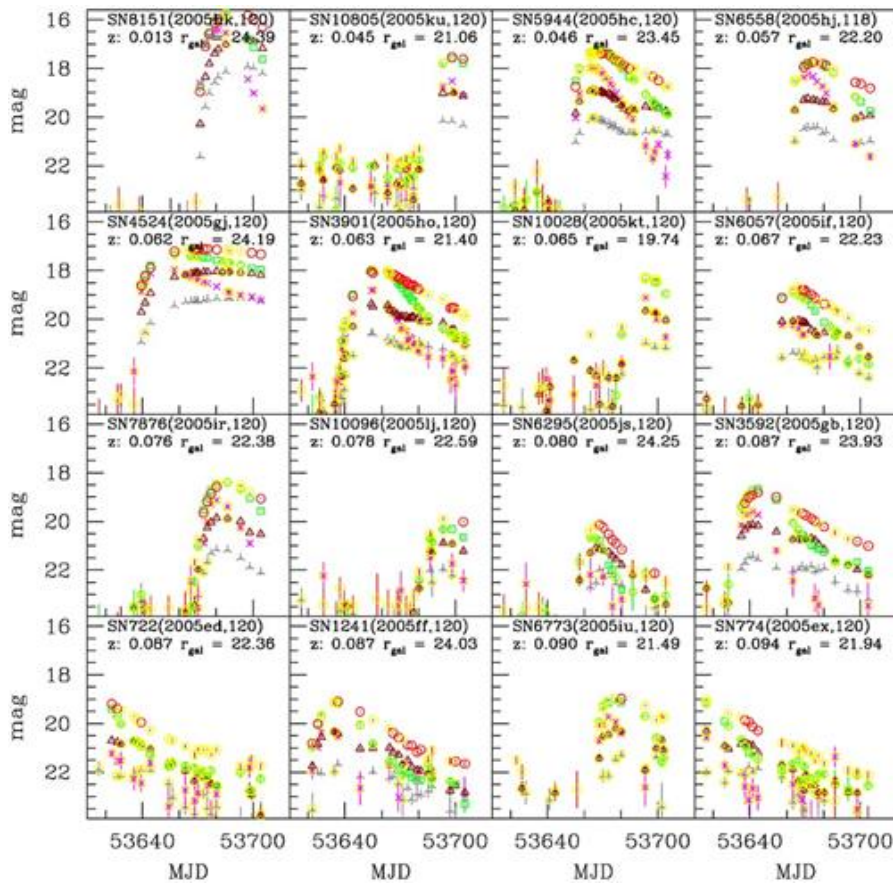
ahol m_λ a látszó, M_λ az abszolút magnitúdó, A_λ az extinkció, K_λ pedig az úgynevezett K-korrekció. A K-korrekció meghatározásához ismerni kell a szupernóva spektrális energia eloszlását. Szokás az így számolt d_L távolságot *luminozitási távolság*-nak nevezni. A távoli szupernóvák spektrális energia-eloszlása az Univerzum tágulása miatt a megfigyelő helyén a kibocsátottól a vöröseltolódás miatt különbözni fog. A K-korrekció a vöröseltolódott és nulla vöröseltolódásnál mérhető abszolút fényességek különbsége az adott λ hullámhosszon.

A fenti egyszerű képet árnyalja, hogy csak az esetek kb. 70%-át alkotják a „normál” Ia szupernóvák, vannak ezektől eltérő, különleges objektumok. Ilyen például a SN 2011fe szupernóva az M101 galaxisban (Nugent et al., 2011). A robbanás előtti galaxis felvételek elemzéséből közvetett úton sikerült kimutatni, hogy a robbanó objektum fehér törpe lehetett (Bloom et al., 2012), a társcsillag viszont nem lehetett vörös óriás vagy nagyobb méretű fősorozati csillag (Li et al., 2011a). Az SN 1991T szupernóva az NGC4527 Sb galaxisban Ia fénygörbét és spektrumot mutatott, de a klasszikus SNe Ia szupernóváknál kb. 0.6 magnitúdóval fényesebb volt (Filipenko et al. 1992a). A 1991bg egy az NGC 4374 elliptikus galaxisban robbant Ia típusú szupernóva volt, melynek mind fénygörbéje, mind spektruma pekuláris, és luminozitása V sávban 1.6 magnitúdóval elmaradt az SNe Ia-knál szokásostól (Filipenko et al. 1992b).

Az SDSS Supernova Survey felmérés során 500 spektrumuk alapján azonosított SNe Ia-t fedeztek fel 300 négyzetfok ismételt pásztázásával a $0,05 < z < 0,4$ vöröseltolódás tartományban.



2.15. ábra: Az SDSS felmérés által talált Ia típusú szupernóvák. (B. Dilday and the Sloan Digital Sky Survey. http://www.sdss.org/includes/sideimages/sn_gallery24.html)

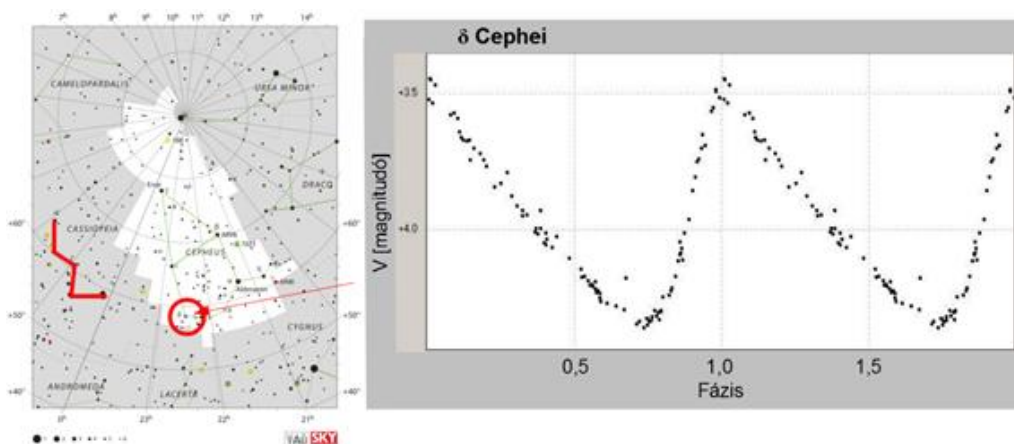


2.16. ábra: Az SDSS szupernóva felmérés SNe Ia fénygörbéi vöröseltolódás szerint rendezve. A lila x-ek az u, a zöld négyzetek a g, vörös karikák az r, a barna háromszögek az i+1, a szürke három ágú csillagok az z + 2 látszó fényesség értékeket jelzik a módosított julián dátum szerinti napokban (MJD) megadott idő függvényében. A sárgával kiemelt szimbólumok a legjobb fotometriai minőséget jelzik. A zárójelekben az objektum IAU által elfogadott jelölését és SDSS osztályát találjuk. Az SDSS osztályok jelentése: 120 = SN Ia az SDSS felmérést végzők szerint; 118 = SN Ia más kutatók által megerősítve. (Holtzman et al. 2008, Fig. 9a)

2.9. A cefeida parallaxis

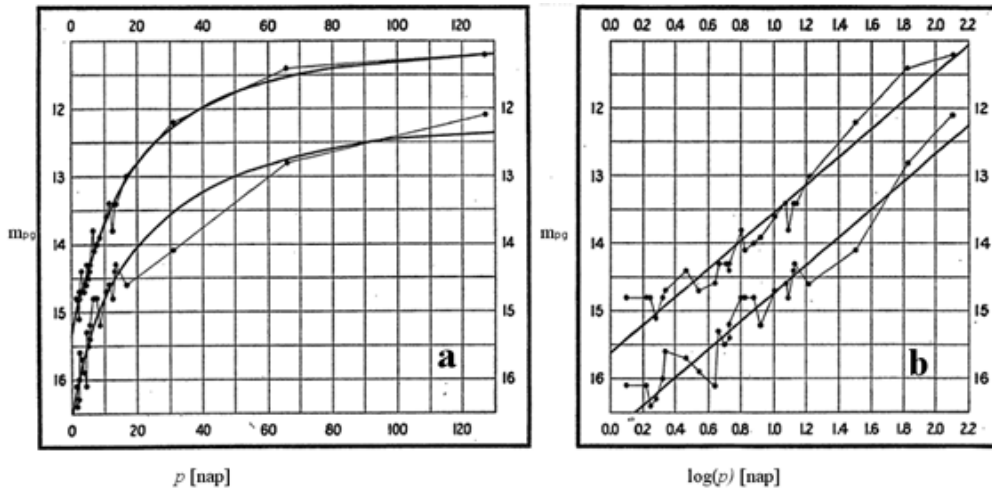
2.9.1. A periódus-luminozitás reláció

Változó csillagokat már a 18. században ismertek, és nem véletlenül ezek között kettő cefeida változó is akadt az η Aquilae (az elsőként felfedezett cefeida) és a δ Cephei (John Goodricke 1784), melynek helyét és fénygörbéjét a 9.17. ábrán mutatjuk be.



2.17. ábra: A δ Cephei pulzáló változó csillag keresőtérképe és V sávú fénygörbéje.

Edward Charles Pickering, az objektívprizmás spektrofotográfia és a Harvard spektrál-klasszifikáció (Williamina Fleminggel) kifejlesztője vezetésével egy csoport hölgy dolgozott fotólemezek kiértékelésén és a csillagok katalógusba foglalásán. A csoport tagjaként Henrietta Swan Leavitt egy a később „Északi Sorozat”-ként emlegetett (*North Polar Sequence*, 96 fotometriai referencia csillag, Pickering publikálta) fotometriai összehasonlító rendszer összeállításával és használatával a fotografikus fotometriát nagy pontossággal tudta elvégezni. A Kis Magellán felhőben 1777 változó csillag fotometriáját adta meg (Leavitt 1908) melyek között több cefeida típusú volt. Már ekkor felismerte, hogy a fényesebb cefeidák nagyobb periódusúak, de kvantitatív összefüggést csak akkor állított fel mikor már 25 csillagra tudta felrajzolni a periódus-fényesség grafikont. A Kis Magellán Felhő csillagaira feltételezte, hogy nagyjából azonos távolságra vannak tőlünk, ezért a látszó fotografikus magnitúdók különbsége a csillag sugárzási teljesítményétől függ. A Pickering aláírásával megjelent cikk elején olvashatjuk, hogy azt Henrietta Leavitt írta (Leavitt & Pickering 1912). Ebben publikálta a Kis Magellán Felhő cefeida változóinak periódus fényesség összefüggését. A fotografikus magnitúdó és a periódus logaritmus között lineáris kapcsolatot talált (lásd 2.17. ábra). Leavitt azt is felvetette, hogy szükséges lenne néhány cefeida parallaxisának meghatározása a kalibrációhoz. Ejnar Hertzsprung ezt szinte azonnal meg is tette. Lewis Boss katalógusából (Boss 1910) megállapította, hogy a cefeida csillagok többnyire kis sajátmozgásúak és nagy radiális sebességűek. A Leavitt által felfedezett összefüggést 13 olyan Boss katalógusbeli cefeidára alkalmazta, melyek távolságát meg tudta becsülni, ezzel „kalibrálta” a periódus-fényesség relációt (Hertzsprung 1913).



2.18. ábra: Periódus-fényesség diagram a Nagy Magellán Felhő cefeida változóira. **(a)** a fotografikus magnitúdók minimum és maximum értékei a napban mért periódusfüggvényeként és az erre illesztett görbék, **(b)** ugyanaz, mint (a), de a periódusok logaritmusai függvényében és egyenes illesztéssel (Leavitt és Pickering, 1912 Fig I és Fig II alapján).

Ejnar Hertzsprung azt is megállapította, hogy a Kis Magellán Felhő cefeidának fénygörbéi a delta Cephei csillagéhoz hasonlóak.

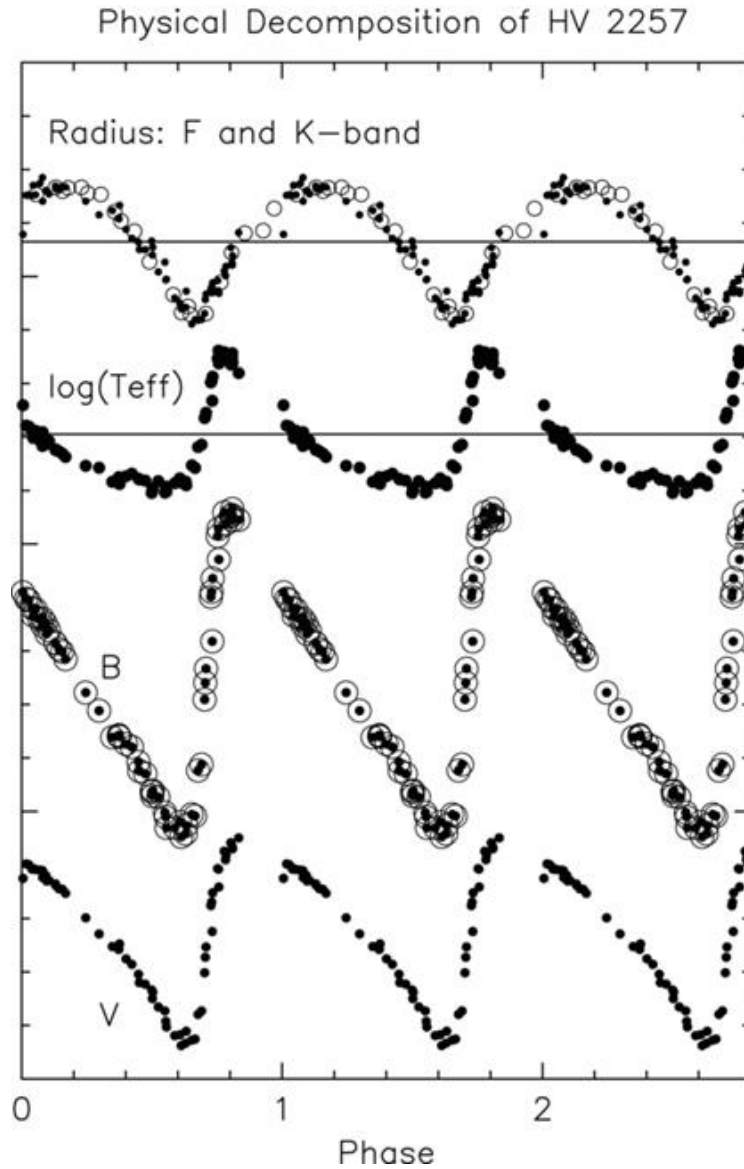
$$M_V = -0,6 - 2,1 \log(P) \quad (2.16)$$

ahol M_V a cefeida átlagos abszolút fényessége a V sávban, $\log P$ pedig a napokban mért pulzációs periódus logaritmus.

Harlow Shapley pontosította a periódus-fényesség reláció nullpontját, de a statisztikus parallaxis számításnál sem az extinkcióra sem a galaktikus rotációra nem volt tekintettel. Ebben az időben még nem különítették el a cefeida populációkat sem. Ezt csak 3 évtizeddel később Baade tette meg. An Andromeda galaxisban mind I mind II populációs cefeidákat mért nagy pontossággal. A klasszikus, vagy I. populációs cefeidákat rendre nagyjából 1,5 magnitúdóval nagyobb luminozitásúnak találta, mint a hasonló periódusú II. populációsokat.

Ma a következő definícióval élünk (átvéve Szatmári Károly jegyzetéből):

- **Klasszikus cefeidák** (δ Cephei csillagok): Radiálisan pulzáló fiatal (I. populációs) fényes szuperóriás csillagok. A periódusuk 1 és 135 nap közötti, az amplitúdó 0,1-2 magnitúdó. A HRD-n jól meghatározott helyen, az instabilitási sávban helyezkednek el. A periódusuk egyenesen arányos a luminozitásukkal, így a fényváltozásukból meghatározható a távolságuk (periódus-fényesség [P-L] reláció). Néhányuk többszörös periodicitást mutat (beat cefeidák). Más elnevezésük: I. típusú cefeidák.
- **W Virginis típusú változók:** A klasszikus cefeidákhoz nagyon hasonló, de kisebb tömegű, II. populációs, idősebb csillagok. A HRD-n és a periódus-luminozitás reláció szerint a cefeidák alatt, velük párhuzamosan találhatóak. Periódusuk 6–35 nap, az amplitúdó 0,3–1,2 magnitúdó. Más elnevezésük: II. típusú cefeidák.



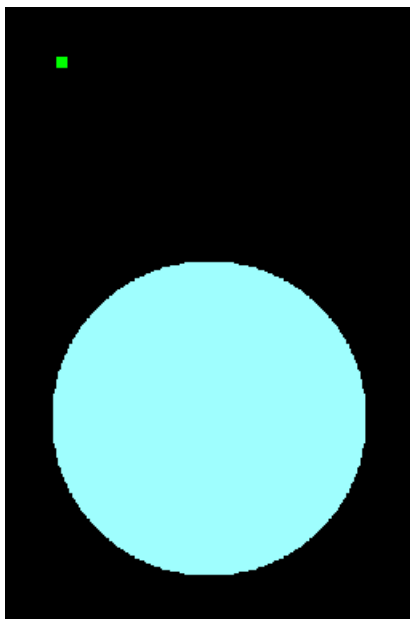
2.19. ábra: HV2257 klasszikus cefeida (azaz δ Cephei típusú) változó sugár és effektív hőmérséklet változása és fénygörbéje B és V színekben. (Freedman & Madore 2010)

Már korábban látszott, hogy a periódus nem független a csillag színétől. Ezt az összefüggést Shapley (1918) a következő formulával adta meg:

$$\text{színindex} = -0,55 - 1,51 \log(P), \quad (2.17)$$

ahol a színindex az átlagos fotografikus és vizuális fényességek különbsége.

A periódus-fényesség reláció alkalmazásakor nagyjából 1 magnitúdó szórás látunk, amit évtizedeken át a mérési pontatlanság számlájára írtak. Halton Arp a Mount Wilson and Palomar Observatories teleszkópjaival a Kis Magellán Felhőben kimutatta, hogy a szórás nagyobb, mint ami a mérési hibából származtatható lenne.



2.1. animáció: Cefeida változó radiális pulzációja (Kolláth, Cefeida_radialis_pulzacio_KollathZ.gif)

Valójában két jól elkülönülő csoportot mostak egybe a korábbi analízisekben. A csoportok közötti alapvető különbség a fémtartalom.

$$M_{pg} = -1,8 - 1,74 \log P \quad (2.18)$$

$$M_{pg} = -0,35 - 1,75 \log P \quad (2.19)$$

A (2.18) egyenletben az úgynevezett klasszikus, vagy I. típusú cefeidák, a (2.19)-ben a 1,5 magnitúdóval halványabb úgynevezett II. típusú társaik $P-L$ relációját látjuk. Utóbbiak 1-50 nap periódusúak. A következő változócsillag csoportokat soroljuk ide: BL Herculis osztály ($1 \text{ nap} < P < 5 \text{ nap}$), WVir osztály ($10 \text{ nap} < P < 20 \text{ nap}$), RV Tau osztály ($20 \text{ nap} < P$). Baade az Andromeda galaxisban mutatta ki a cefeidák két különböző populációját. II. típusú cefeidákat találunk a galaktikus gömbhalmazokban és a törpe szferoidális galaxisokban is.

A populációk és a cefeidák pontosított $P-L$ relációja szerint az összes II. típusú cefeidákon alapuló extragalaktikus távolságot meg kellett duplázni. A $P-L$ reláció nullpontjának és alakjának pontosítása a pulzáló változók alosztályainak azonosításával együtt napjainkig folyik. Ehhez független távolság meghatározási módszereket kell alkalmazni. sokat segítenek a nyílthalmazokban található cefeidák (pl. S Normae és U Sagittarii). A nyílthalmazok távolsága meghatározható fősorozat-illesztéssel, figyelembe véve a csillagközi és halmazbeli vörösödést. Ha ismert a halmaz távolsága, akkor a halmazhoz tartozó cefeida abszolút fényessége is könnyen meghatározható, ami kiváló lehetőséget nyújt a $P-L$ reláció nullpontjának pontosítására.

A $P-L$ relációnál észlelt nagyjából 1 magnitúdós szórás sokáig a mérési hibának tulajdonították. Halton Arp az SMC cefeidáinak fotoelektromos mérésével igazolta, hogy a szórás a mérési hibáknál sokkal nagyobb. Sandage javasolta, hogy a periódus és fényesség mellett egy harmadik paramétert, a csillag felszíni hőmérsékletére utaló B-V színindexet is vegyék figyelembe. A periódus-fényesség-szín reláció:

$$M = A \log(P) + b(B-V) + C \quad (2.20)$$

ahol az A, b és C konstansokat mérésekből határozzuk meg.

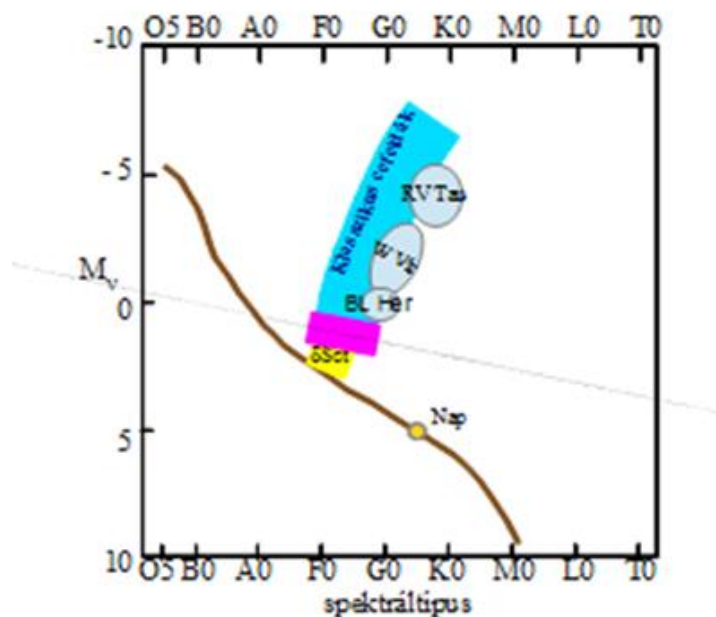
2.9.2. A cefeidák használatának előnye a távolság meghatározásban

- (1) A cefeida változók nagy luminozitású objektumok, a Tejútrendszerben, közeli galaxisokban, sőt a Virgo szuperhalmazon belüli más galaxisokban is eséllyel használhatjuk ezeket távolság meghatározására.
- (2) A periódus-luminozitás reláció viszonylag pontosan ismert, alkalmazása egyszerű.
- (3) Az elvégzendő mérések száma nem túl nagy, a cefeidák periódusa nem túl hosszú és nem is túl rövid, ezért megfelelő asztroklimájú észlelő helyről szerény távcsőidő felhasználásával is végrehajthatók.
- (4) A cefeidák elég gyakoriak, azért legalább néhányat találunk minden galaktikus, és extragalaktikus csillaghalmazban.

2.9.3. A cefeida pulzáló változók fizikai leírásának alapjai

Arisztarh Apollonovics Belopolszkij a pulkovói obszervatóriumban kimutatta, hogy a delta Cephei radiális sebessége változik (Belopolszkij 1894). További mérések szerint mindegyik cefeida hasonlóan viselkedik. A színképvonalak hullámhosszának periodikus változását magyarázhatná a cefeidák kettőssége és a keringés miatt látható a periodikus Doppler-eltolódások. Shapley (1914) azonban kimutatta, hogy a fényváltozás mértéke függ a hullámhossztól, ez csillagfedéskor nem lenne így, illetve a kísérő csillag túlságosan közel kellene keringjen. Shapley megállapította, hogy a cefeidák periódusos fényváltozását a csillag pulzációja okozza. Ez leegyszerűsítve a következőképpen történik: Amikor a csillag légkörének sűrűsége az összehúzódáskor megnövekszik, a hélium atomok rekombinálnak és jelentős mennyiségű fotont tudnak elnyelni. A sugárzási energia egy része ezért a csillagban marad, és a csillag felmelegszik, a külső szemlélő pedig halványodást észlel. A felmelegedéstől a csillag légköre tágulni kezd, a ritkább közegben a hélium atomok újra ionizálódnak, és a légkör átlátszóbb lesz. A külső szemlélő ekkor felfénylést láthat. Ahogy az energia kiszabadul a nyomás lecsökken és egy újabb összehúzódással új ciklus kezdődik. A pulzációs periódus a csillag átlagsűrűségétől függ, a sűrűbbek rövidebb periódusúak.

Ahogy azt már Shapley (1927) is kimutatta, a pulzációs periódus és színindex, avagy a spektráltípus összefüggenek. A spektráltípus megfeleltethető effektív hőmérsékletnek, vagy luminozitásnak, a periódus pedig abszolút fényességnek, vagyis a szín-fényesség diagramon (HRD) a cefeidák egy körülhatárolható tartományban kell legyenek. Itt találjuk még az RR Lyrae, delta Scuti, BL Herculis és RV Tauri típusú radiális pulzáló változó osztályokat is. Ez a terület az úgynevezett instabilitási sáv (lásd 2.20. ábra).



2.20. ábra: A pulzáló változók néhány fő osztályának megjelenése a HRD-n – sematikus rajz.

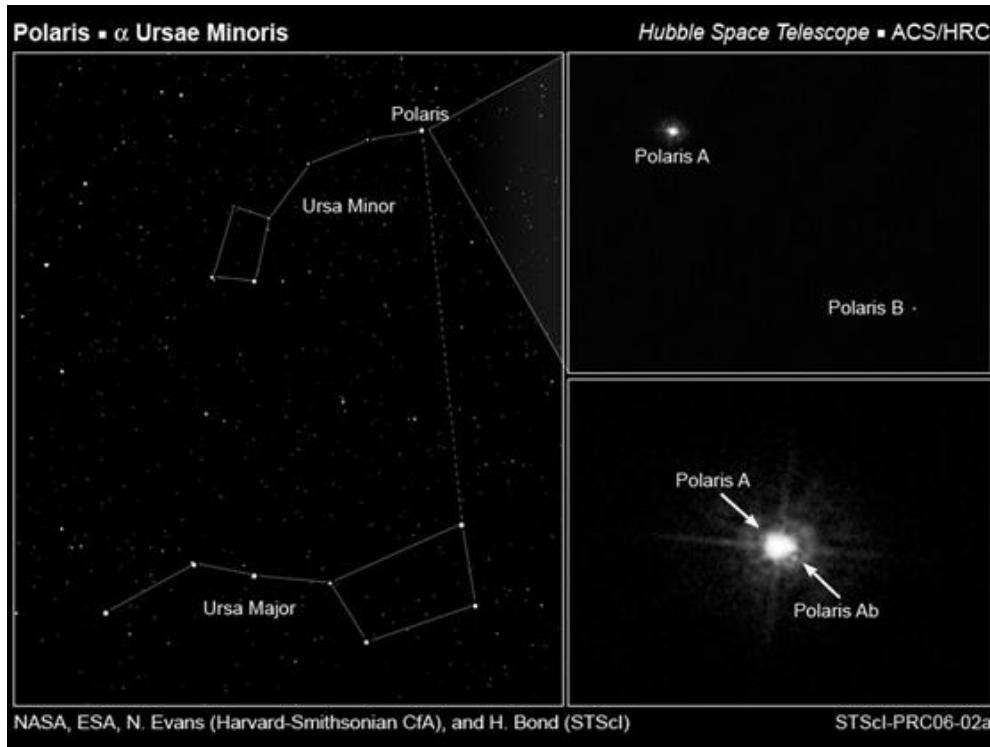
2.9.4. A periódus-luminozitás reláció alkalmazása a gyakorlatban

2.9.4.1. A P-L módszer pontossága

A változó típusát beazonosítjuk, és a fényváltozás periódusát meghatározzuk a csillag fénygörbéjéből. A cefeida látszó fényességét megmérjük, a periódus-luminozitás relációból abszolút fényességet kapunk, és ezekből kezünkben a csillag távolsági modulusa. Ezek után az eljárásból a távolság meghatározásának pontossága attól függ, hogy:

- a periódus-luminozitás relációt milyen pontossággal tudjuk megadni
- a látszó magnitúdót mennyire pontosan mérjük
- a csillagközi extinkcióra milyen pontos becslést tudunk adni

A periódus pontatlanságánál meg kell említsük a kettősséget. A cefeidák periódusának változása mutat periódusos és szabálytalan változásokat is. A periodikus változások egyik fő okaként tartjuk számon a kettős rendszerben való keringést, mint például a Polaris (α UMa) esetében (lásd 2.21).



2.21. ábra: A Polaris egy többes rendszer tagja. A 4,7 naptömeg tömegű szuperóriás α UMi A egy klasszikus cefeida (Evans, Bond, NASA, ESA, STScI).

A Polaris egy többes rendszer tagja. A rendszer fő csillaga a 4,7 naptömeg tömegű szuperóriás α UMi A, egy klasszikus cefeida. Körülötte 18,8 CSE-re kering az 1,26 naptömeg tömegű α UMi Ab és 2400CSE-re az α UMi B csillag 1,39 naptömeg tömeggel, továbbá két távolabbi kísérő, az α UMi C és az α UMi D. A Polaris periódusában egy 30 év körüli periódusváltozási ciklus látható, ami jól egyezik a b komponens keringési idejével (Usenko 2005).

2.9.4.2. Számítsunk távolságot!

Végezzünk fotometriai méréseket egy halmazra néhány egymást követő éjszaka, és a felvételeken azonosítsunk változókat! Nagyjából két hét után nagy biztonsággal ki tudjuk választani a klasszikus cefeida fénygörbével változókat a mintából. Ezeknek meghatározzuk a periódusát és tegyük fel, azt kapjuk, hogy egyikük $P=6,25$ nap periódussal pulzál. Látszó fényességére $V=7$ magnitúdót kapunk a Johnson-féle V sávban. A periódus-luminozitás grafikon szerint:

$$M_V = -2.81 \log P + 1.43, \quad (2.21)$$

ahol M_V az abszolút magnitúdó. A konstans (1,43) a Hipparcos műhold parallaxis méréseivel kalibrálta Feast & Catchpole (1997).

Helyettesítsük be a periódus méréseinkből számított értékét!

$$M_V = -2.81 \log(6,25) + 1,43 = -0,8 \quad (2.22)$$

Tehát az abszolút magnitúdót ismerve a távolsági modulus felírható:

$$V - M_V = -5 + 5 \log d + A_V, \quad (2.23)$$

ahol a d távolságot parszekben mérjük, és A_V a V sávú teljes extinkció a csillag és műszerünk között. Rendezzük az egyenletet d -re, majd helyettesítsük be!

$$\log d = 0,2(V - M_V - A_V) + 1 \quad (2.24)$$

$$d = 10^{0,2(V - M_V - A_V) + 1} \quad (2.25)$$

$$d = 10^{0,2(7+0,8-A_V)+1} = \frac{10^{2,56}}{10^{0,2A_V}} = \frac{363}{10^{0,2A_V}} \quad (2.26)$$

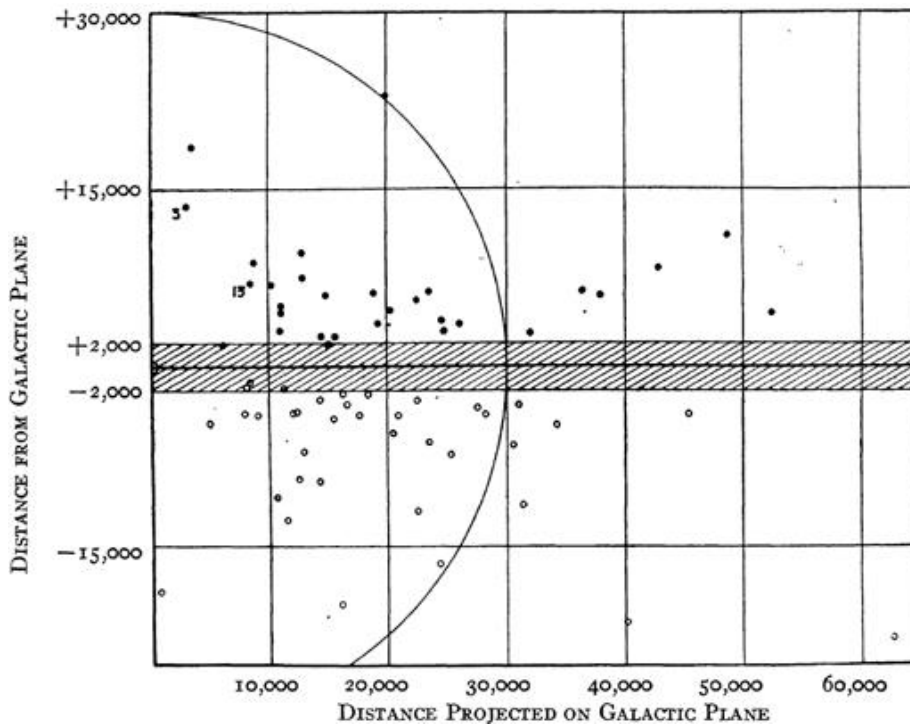
Látjuk, hogy ha az A_V extinkció nem nulla, akkor elhanyagolásával a valóságos távolságnál nagyobbat kapunk. Az extinkciót kihagyva az egyenletről, a távolság felső korlátját kapjuk. Számításunkhoz tehát ismerni kellene az extinkciót értékét is. Még a legközelebbi ($d = 132$ pc) cefeida változó, a kis amplitúdójú Polaris (α UMi) fénye is áthalad valamennyi galaktikus csillagközi anyagon. Az α UMi vörösödése: $E(B-V) = 0.03$ mag, ami kb. $A_V = 0,1$ extinkciónak felel meg (Gauthier & Fernie 1978, Usenko et al. 2005). Ha az extinkció kicsi (\square), akkor elhanyagolásával kis ($\leq 10\%$) hibát vétünk. A galaktikus iránytól függően az extinkció becsülhető a távossággal:

$$0,5 \text{ mag kpc}^{-1} \leq \frac{A_V}{d} \leq 1,5 \text{ mag kpc}^{-1} \quad (2.27)$$

2.10. A P-L módszer néhány tudománytörténetben fontos alkalmazása

2.10.1. Shapley – távoli gömbhalmazok

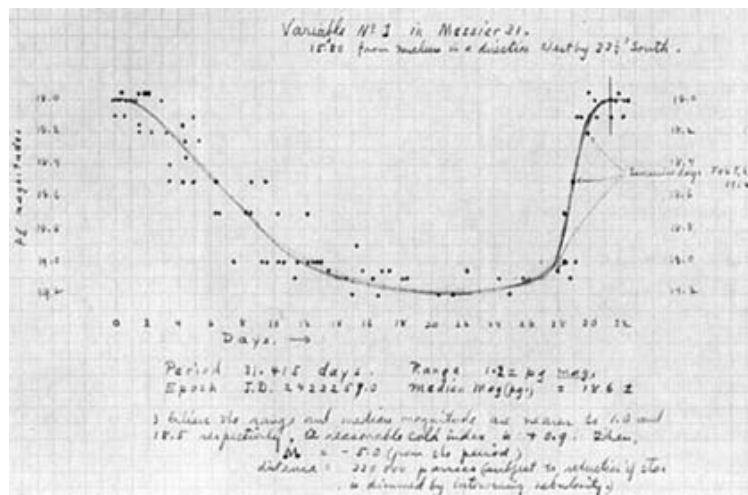
A Nap Galaktikus helyének első tudományosan megalapozott meghatározása cefeidákkal történt. A gömbhalmazok nem egyenletesen oszlanak el az égbolton, hanem a Sagittarius felé koncentrálni látszanak. Harlow Shapley ebből kiindulva próbált egy galaxis modellt alkotni. Ehhez a gömbhalmazok távolságára is szüksége volt, amit cefeida változók segítségével próbált meghatározni. Amikor Leavitt és Pickering 1912-ben a P-L relációt publikálta, a pulzáló változók típusai még nem voltak ismertek. Shapley pulzáló változókat azonosított gömbhalmazokban, és megmérte azok periódusát és látszó fényességét. Mérései alapján és a P-L reláció egy saját kalibrációját alkalmazva kiszámította az ismert gömbhalmazok távolságát. Azt találta, hogy az egymástól legtávolabbinak mutatkozó NGC7006 és NGC4147 gömbhalmazok egymástól 100000 pc-re vannak. Ezzel a Galaxis méretét is megbecsülve, mondván, hogy az sem lehet ennél kisebb. A gömbhalmazok rendszerének középpontjára $RA=17^h30^m$, $Dekl.= -30^\circ$ irányban 20000pc-et kapott. Ezzel kijelölte Galaxisunk középpontját. Mind a Galaxis mérete, mind a Nap galaktocentrikus távolsága többszöröse volt a korábban feltételezettnek. Shapley valójában RR Lyrae típusú pulzáló változókat azonosított cefeidákként. Ezek abszolút fényessége viszont kisebb a klasszikus cefeidáknál, továbbá nem számolt a csillagközi anyag okozta extinkcióval, ezért becsülte túl a méreteket.



2.22. ábra: Shapley eredeti ábrája a gömbhalmazok (körök) galaktikus elhelyezkedéséről. Az M3 és M13 halmazokat számmal is megjelölte. A távolság mértékegysége a pc. Az úgynevezett „zone of avoidance” a galaktikus fősík csillagközi anyaga miatt kevésbé jól megfigyelhető sáv. (Shapley 1918).

2.10.2. Hubble – vannak extragalaxisok

A „sziget univerzumok”-ról folytatott vitának 1924-ben Edwin Hubble mérései vetettek véget. Az 1920-as években Edwin Hubble a Mount Wilsonon a világ akkori legnagyobbját, a 100 inches Hooker teleszkópot használva cefeida változókat azonosított az Andromeda galaxisban (M31). 1924 februárjában Hubble levélben küldte el Harlow Shapley-nek az M31 egyik cefeida változójának fénygörbéjét. Shapley a levelet (2.23. ábra) elolvasva állítólag azt mondta: „Íme a levél, mely Univerzumomat lerombolta.” Hubble a cefeida változó és így az M31 távolságára több mint 220kpc-et számolt. Ez Shapley legtávolabbi gömbhalmazáénál is jóval nagyobb távolság, tehát az M31 nem férhetett bele Shapley galaxisába.



2.23. ábra: Illusztráció E. Hubble 1924-ben H. Shapley-nek írt leveléből, az Andromeda galaxisban (Messier 31) mért Cefeida változó fénygörbéjével.

<http://www.aip.org/history/cosmology/ideas/larger-image-pages/pic-island-luminosity-curve.htm>

1924-re Hubble már 47 változót azonosított az M33-ban, ebből 22 cefeidát, és 36-ot az M31-ben köztük 12 Cefeidát. A periódus-fényesség és periódus-színindex viselkedésük hasonló volt a közeli és a Magellán Felhőkben korábban felfedezettekéhez. A periódus-fényesség relációból távolsági modulust számított, feltette, hogy lényeges fényelnyelés nem volt.

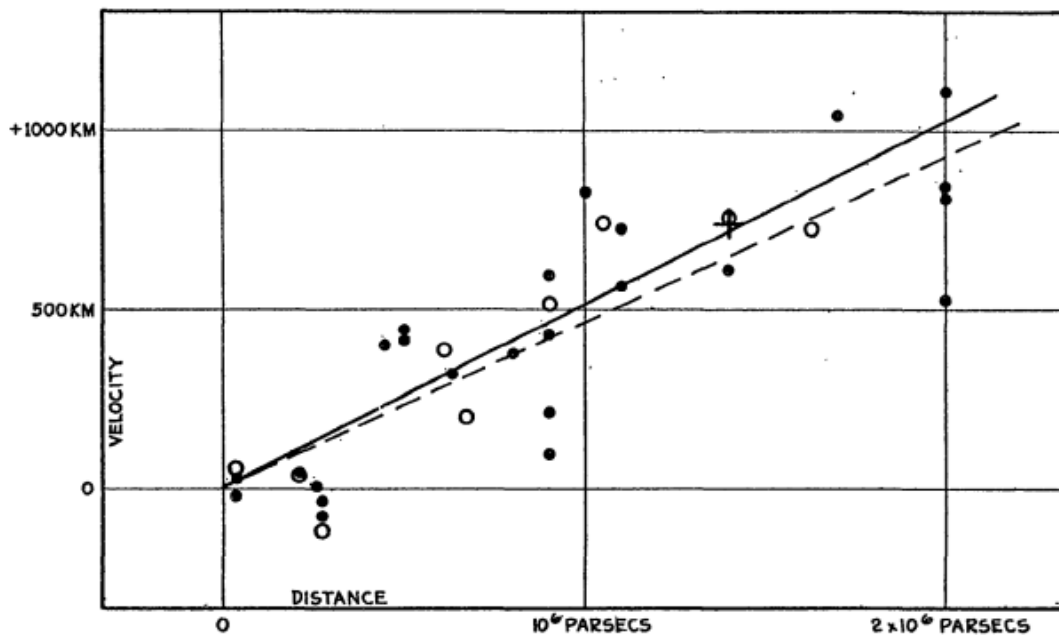
Hubble az American Astronomical Society 1924-es találkozásán bejelentette eredményét, hogy az M31-re és M33-ra -22.3 távolsági modulust és ebből 285 kpc távolságot határozott meg (Hubble 1925). Egy évvel később az M33-ra 263kpc-et publikált (Hubble 1926).

Hubble méréseinek kiértékelését később Baade pontosította a P-L reláció revíziójával. Az Androméda távolságát (és több más galaxisét), kb, kétszer „magnövelte. A pontosítás mögött a cefeida jelöltek spektrális tulajdonságainak vizsgálata állt, melyből kiderült, hogy két erőteljesen eltérő fémtartalommal bíró I. és II. populációs csoportra bomlanak, illetve elkülönítették az RR Lyrae típusú pulzáló változókat.

2.10.3. A Hubble állandó

Az általános relativitáselméletre alapozott számításai és Hubble távolság mérési eredményei alapján Georges Lemaître feltételezte, hogy a világegyetem tágul. A távolodás távolság-függését vizsgáló Edwin Powel Hubble 24 galaxis pozícióját, radiális sebességét, és távolságát hasonlította össze. A galaxis távolságok nővák, kék csillagok, és cefeidák távolságának meghatározásán alapultak, melyek közül az első kettő – Hubble szavai szerint – csak nagyságrendi ellenőrzésre volt alkalmas. A v távolodási sebességet Hubble a következő alakban kereste:

$$rK + X \cos \alpha \cos \delta + Y \sin \alpha \cos \delta + Z \sin \delta = v \quad (2.28)$$



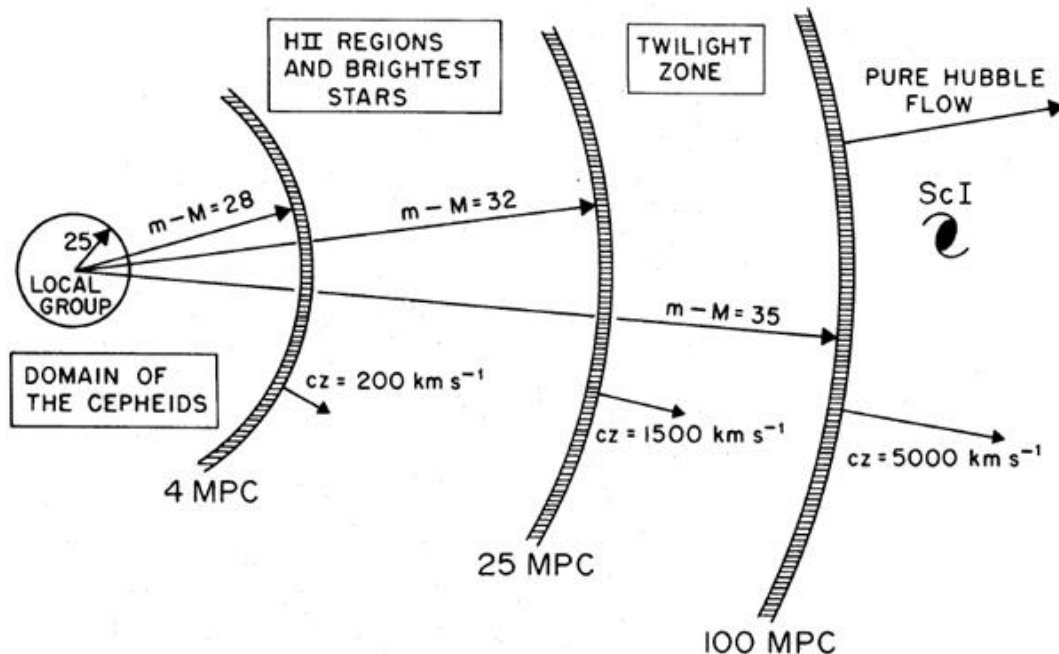
2.24. ábra: A távolság és a vöröseltolódásból számolt távolodási sebesség lineáris korrelációja Hubble eredeti ábráján (Hubble 1929). Minden tele kör egy-egy galaxist jelöl, az üres körök galaxis csoportokat, a + pedig 22 olyan galaxis átlagát melyekre külön-külön nem tudott távolságot meghatározni.

A 2.24. ábra szerint a távolság együtthatója az adatok csoportosításától függően $465 \pm 50 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ illetve $513 \pm 60 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ -nek adódott. Hubble végül a kettő közötti értéket közölte:

$$K = 500 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \quad (2.29)$$

2.10.4. Sandage és Tamman – a Hubble állandó korrekciója

A cefeidák és a P-L reláció további lényeges alkalmazása volt a Hubble által kimutatott távolodási törvény kalibrálása. Allan Sandage és Gustav Andreas Tamman azt feltételezték, hogy a legnagyobb HII zónák az azonos galaxisokban nagyjából hasonló méretűek és így hasonló luminozitásúak lehetnek. Kalibrálniuk kellett a közeli galaxisok HII zónáira a galaxis luminozitási osztálya és a legnagyobb HII zónája mérete közti összefüggést, és ehhez használták a cefeidákat. Első lépésben tehát cefeida parallaxissal megállapították a HII zónákat befogadó közeli galaxisok távolságát. Megmérték a 3 legnagyobb HII zóna szögátmérőjét, majd a távolságból lineáris méretüket. Ezután felállítottak egy a galaxisok luminozitási osztálya és a legnagyobb HII zóna átmérője közti relációt. Ezután ezeket standard mérőrüdként használva galaxishalmazunkon túli HII zónákat tartalmazó galaxisok távolságát is megkaphatták (lásd 2.25. ábra). Ezeket a galaxis távolságokat korreláltatták a galaxisok radiális sebességével, ami elvezetett a $v = H_0 d$ Hubble törvény H_0 konstansának meghatározásához, melyre $H_0 \approx 67 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ értéket kaptak. A Sandage-Tamman kettőssel egy időben Gérard de Vaucouleurs a Hubble állandót 90-100 $\text{km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ tartományba tette. A Sandage-Tamman kettőssel évekig elkeseredett vitát folytatott.



2.25. ábra: A távolságmérés lépései, kezdve a cefeida parallaxissal (Sandage & Tamman 1974, Fig.1)

A Hubble konstans legutóbbi értéke a Planck Űrteleszkóp méréseinek elemzéséből egy hat paraméteres Λ CDM Hűvös Sötétanyag (ΛCDM) kozmológiai modellel: $H_0 = 67.3 \pm 1.2 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (Ade et al. 2013).

2.11. Távolság meghatározása a Hubble törvénnyel

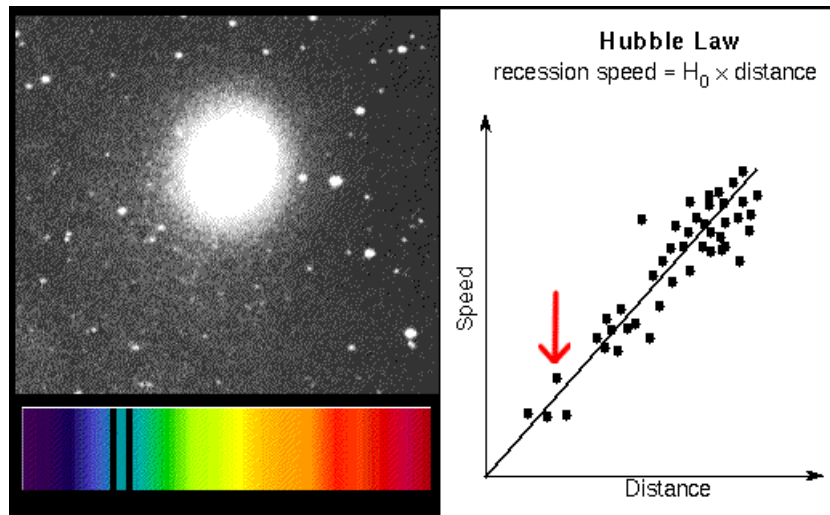
Vesto M. Slipher közeli galaxisok (ő ezeket nebulákként említi) spektroszkópiai megfigyelését végezte 1912-14 körül. Egyfelől emissziós és abszorpciós spektrumú nebulákra osztotta azokat, másfelől meghatározta azok radiális sebességét spektrumvonalaik eltolódásából. A sebességek tág határok közt változtak, -300 km s^{-1} -től (mint például az Androméda galaxis, Slipher 1913) $+1100 \text{ km s}^{-1}$ -ig (mint például az NGC 1068, Slipher 1915).

Willem de Sitter a „spirális ködök” megfigyelt vöröseltolódását Doppler effektusként értékelte, és 1917 Einstein általános relativitás elméletére alapozott kozmológiai modelljében egy táguló Világegyetemet vázolt fel. Egy ideig a galaxisok vöröseltolódását „de Sitter effektus”-ként is emlegették.

Shapley-Curtis vitában 1920-ban **Herber Curtis** ezekre a vöröseltolódásokra utalva is érvelt a spirálködök extragalaktikus volta mellett.

Carl Wirtz 1923-ban a vöröseltolódást mutató galaxisok látszó méretéből távolságot becsült, és állította, hogy Slipher vöröseltolódás méréseiből egy sebesség-távolság összefüggés kapható, hiszen a vöröseltolódás arányos a távolsággal.

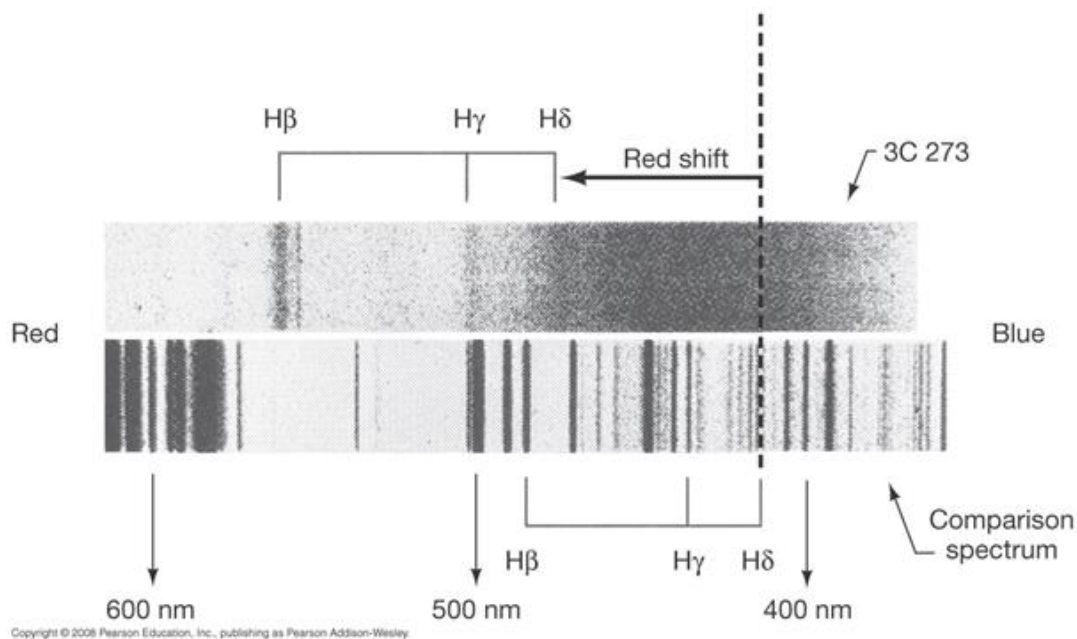
Edwin P. Hubble és Milton Humason, a Mt. Wilson Observatory 100 inches távcsövével a korábbi távolságok pontosításán fáradozott az 1920-as években. Ez vezetett el a ma Hubble törvényként ismert összefüggéshez. Ha az arányossági együtthatót meghatározzuk, akkor a mért radiális sebességekből számítható lesz az extragalaktikus objektum távolsága (lásd 2.2. animáció). A 2.26. ábrán sorban egyre távolabbi galaxishalmazok egy-egy galaxisának spektrumán mutatjuk be a távolságfüggő vöröseltolódást, a 2.27. ábra pedig a 3c273 kvazárét.



2.2. animáció: Távolság és vöröseltolódás (http://astro.wku.edu/astr106/Hubble_law_anim.gif)

Cluster nebula in	Distance in light-years	Redshifts
Virgo	78,000,000	H + K 1,200 km s ⁻¹
Ursa Major	1,000,000,000	15,000 km s ⁻¹
Corona Borealis	1,400,000,000	22,000 km s ⁻¹
Bootes	2,500,000,000	39,000 km s ⁻¹
Hydra	3,960,000,000	61,000 km s ⁻¹

2.26. ábra: Galaxisok látható tartományú képei, távolságuk és vörös-eltolódott spektrumuk. A Virgo, UMa CrB Boo and Hyd galaxishalmazok egy-egy galaxisa (http://astro.wku.edu/astr106/H_K_redshift.jpg).



2.27. ábra A 3c273 kvazár vöröseltolódása a galaxis és egy referencia galaxis nem vöröseltolódott emissziós spektruma. (<http://physics.uoregon.edu/~jimbrau/astr123/notes/chapter24.html#law>)

Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:

Ade P.A.R. et al. 2013: „Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters”, <http://arxiv.org/pdf/1303.5076v1.pdf>

Arp, H.C., 1953: „Variable stars with periods greater than one day in globular clusters”, Thesis (Ph.D.) -- California Institute of Technology, <http://thesis.library.caltech.edu/1616/>

Baade, W. 1944: „The Resolution of Messier 32, NGC 205, and the Central Region of the Andromeda Nebula”, *ApJ*...100..137B

Belopolsky, A. A. 1894, „Das Spectrum von δ Cephei”, *Astr. Nachr.*, 136, 281

Bishop, D.: „Supernova 1999aa in NGC 2595”, <http://www.rochesterastronomy.org/snimages/sn1999/sn1999aa.html>

Bloom, J. et al. 2012: *A Compact Degenerate Primary–star Progenitor of SN 2011fe*. *The Astrophysical Journal Letters*. 744, L17, DOI:10.1088/2041-8205/744/2/L17

Boss, L., 1910: „Preliminary General Catalogue of 6188 stars for the epoch 1900”, Washington, D.C.: Carnegie Institution, 1910

Capellaro, E., & Turatto, M. 2001: „Supernova types and rates”. The influence of binaries

on stellar population studies, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers,

2001, xix, 582 p. *Astrophysics and space science library (ASSL)*, 264, 2001.

Cserepes, L. & Petrovay, K. 2002: “*Kozmikus fizika*”, egyetemi jegyzet, <http://astro.elte.hu/astro/hun/oktatas/kofi.html>

- Dressler, A. et al. 1987:** „*Spectroscopy and photometry of elliptical galaxies. I - A new distance estimator*”, ApJ...313...42D
- Faber, S. M. & Jackson, R. E. 1976:** „*Velocity dispersions and mass-to-light ratios for elliptical galaxies*”, ApJ...204..668F
- Filipenko, A.V., 1992:** „*The peculiar Type Ia SN 1991T: Detonation of a White Dwarf?*”, ApJ, 384, 15
- Filipenko, A.V., 1992:** „*The Subluminoous, Spectroscopicallypeculiar type Ia Supernova 1991bg in the elliptical galaxy NGC 4374*”, 1992AJ....104.1543
- Freedman, W. L. & Madore, B. F. 2010:** „*A physically based method for scaling cepheid light curves for future distance determinations*”, ApJ, 719, 335
- Frieman, J.A. et al., 2008:** „*The Sloan Digital Sky Survey-II Supernova Survey: Technical Summary*”, Astronomical Journal, 135, 338
- Gauthier, R. P.; Fernie, J. D. 1978:** „*The reddening of Polaris*”, PASP...90..739
- Gordon, K. J. 1959:** „*History of our Understanding of a Spiral Galaxy: Messier 33*”, Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society, 10, 293-307. http://ned.ipac.caltech.edu/level5/March02/Gordon/Gordon_contents.html
- Hertzsprung, E. 1909:** „*Über die Sterne der Unterabteilung c und ac nach der Spektralklassifikation von Antonia C. Maury*”. Astronomische Nachrichten, **179** (4296): 373–380. Bibcode:1909AN....179..373H.
- Hertzsprung, E., 1913:** „*Über die räumliche Verteilung der Veränderlichen vom δ Cephei-Typus*”, Astronomische Nachrichten, volume 196, p.201
- Holtzman, J.A. et al. 2008:** „*The Sloan Digital Sky Survey-II: Photometry and supernova Ia light curves from the 2005 data*”, Astronomical Journal 136, 2306
- Hsiao, E. Y. et al., 2007:** „*K-corrections and spectral templates of Type Ia supernovae*”, ApJ. 663, 1187.
- Hubble, E. P., 1925:** „*Cepheids in Spiral Nebulae*”, Pop. Astr.; Vol. 33; Page 252
- Hubble, E. P., 1926:** „*A spiral nebula as a stellar system: Messier 33*”, ApJ....63..236H
- Jha, S. et al. 2006:** „*UBVRI light curves of 44 type ia supernovae*” AJ, 131, 527
- Kennicutt, R.C. Jr. 1981:** „*The shapes of spiral arms along the Hubble sequence*” Astron. J. 86, 1847
- Klagyivik, P. 2010:** „*A cefeida típusú változócsillagok jellemzői közötti összefüggések átfogó vizsgálata*”, PhD dolgozat, ELTE, http://teo.elte.hu/minosites/ertekezes2010/klagyivik_p.pdf
- Kolláth, Z. 1997:** „*Gallery of stellar pulsation / A csillagpulzáció galériája*”, <http://www.konkoly.hu/staff/kollath/gallery.html>
- Leavitt, H.S., 1908:** „*1777 variables in the Magellanic Clouds*”, Annals of Harvard College Observatory, vol. 60, pp.87-108.3 http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-article_query?1908AnHar.60..87L&data_type=PDF_HIGH&whole_paper=YES&type=PRINTER&filetype=pdf
- Leavitt, H.S., and Pickering, E.C., 1912:** „*Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud*”, Harvard College Observatory Circular, vol. 173, pp.1-3 http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-article_query?1912HarCi.173...1L&data_type=PDF_HIGH&whole_paper=YES&type=PRINTER&filetype=pdf
- Leibundgut, B. 2001:** „*Cosmological Implications from Observations of Type Ia Supernovae*”, 2001ARA&A..39..67L
- Lemaître, G. 1927:** „*Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques*”, ASSB...47...49L

Li, W. et al. 2011: *Exclusion of a Luminous Red Giant as a Companion Star to the Progenitor of Supernova SN 2011fe*. Nature. 480, 348 • DOI: 10.1038/nature10646

Lucey, J.R. et al. 1991: „*New D-sigma results for Coma cluster ellipticals*”, MNRAS.253..584L

Marik, M., 1989: „*Csillagászat*”, Budapest, Akadémiai kiadó

Matheson, T. et al. 2008: „*Optical Spectroscopy of Type Ia Supernovae*”, <http://arxiv.org/abs/0803.1705>

Nugent, P. E. et al. 2011: *Supernova SN 2011fe from an Exploding Carbon–oxygen White Dwarf Star*. Nature. 480, 344–347. • DOI:10.1038/nature10644

Phillips, M. M. 1993: „*The absolute magnitudes of Type IA supernovae*”, 1993ApJ...413L.105P

Pogge, R. W. 2006, A trigonometrikus parallaxist bemutató kisfilm: <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Movies/parallax.html>

Rhee, H., & Broeils, A. H., 2005: „*Hi Linewidths, Rotation Velocities*

And The Tully-Fisher Relation” **J. Astron. Space Sci. 22(2), 89**

Rosenberg, H. 1910: "Über den Zusammenhang von Helligkeit und Spektraltypus in den Plejaden". *Astronomische Nachrichten* 186 (4445): 71–78.

Russell, H. N. 1914: "Relations Between the Spectra and Other Characteristics of the Stars". *Popular Astronomy*, 22: 275–294. Bibcode:1914PA.....22..275R.

Sako, M. et al., 2008: „*The Sloan Digital Sky Survey-II Supernova Survey: Search Algorithm and Follow-Up Observations*”, *Astronomical Journal*, 135, 348.

Sandage, A. & Tammann, G. A. 1968: „*A Composite Period-Luminosity Relation for Cepheids at Mean and Maximum Light*”, *ApJ*...151..531S

Sandage, A. & Tammann, G. A. 1974: „*Steps Toward the Hubble Constant. Calibration of the Linear Sizes of Extra-Galactic H II Regions*”, *ApJ*...190..525S

Shapley, H. 1918: „*Globular Clusters and the Structure of the Galactic System*”, *PASP*...30...42S

Shapley, H. 1918: *ApJ*, 48, 279

Shapley, H. 1923: „*North Polar sequence*” *Harvard College Observatory Bulletin* No. 781, pp.1-2

Slipher, V. M. 1913: „*The radial velocity of the Andromeda Nebula*”, *Lowell Observatory Bulletin*, vol. 1, pp.56, [LowOB...2...56S](#)

Slipher, V. M. 1914: „*The detection of nebular rotation*”, *Lowell Observatory Bulletin*, vol. 2, pp.66 [LowOB...2...66S](#)

Slipher, V. M. 1915: „*Spectrographic Observations of Nebulae*”, *Popular Astronomy*, Vol. 23, p. 21 [PA.....23...21S](#)

Szabó, Róbert 2004: „*Az RR Lyrae instabilitási sáv numerikus modellezése*”, Doktori értekezés, ELTE, http://real-phd.mtak.hu/23/1/Szab%C3%B3_R%C3%B3bert.pdf

Szabó, Károly, „*Változócsillagok*”, Szegedi Tudománygyetem Kísérleti Fizikai Tanszék <http://astro.u-szeged.hu/oktatas/asztrofizika/3valtozocsillagok.pdf>

Szegedi Tudománygyetem Kísérleti Fizikai Tanszék, „*Pulzáló változócsillagok*”, <http://astro.u-szeged.hu/ismeret/valtozok/pulzalok.html>

Szegedi Tudománygyetem Kísérleti Fizikai Tanszék, „*Távolságmérés a világegyetemben*”, http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat/8_Galaktikus_csillagaszat/GAL2.html

Usenko, I. A. et al. 2005: „*Polaris, the nearest Cepheid in the Galaxy: atmosphere parameters, reddening and chemical composition*”, MNRAS, 362, 1219

Vinkó, J. , 2007: „*Távolságmérés szupernóvával*”, Fizikai Szemle 2006/7. 221.

Vinkó, J. , 2013: „*Rejtélyes csillagrobbanások*”, Magyar Tudomány, 2013, 2
<http://www.matud.iif.hu/2013/02/02.htm>

Wallerstein, G. 2002: „*The Cepheids of Population II and Related Stars*”, PASP..114..689,
<http://www.jstor.org/stable/10.1086/341698>

Way, M.J., 2013: „*Dismantling Hubble's Legacy?*”, in Origins of the Expanding Universe: 1912-1932, ASP Conference Series, Vol. 471, eds: Michael J. Way and Deidre Hunter, <http://arxiv.org/pdf/1301.7294v1.pdf>

3. fejezet - Alaktani osztályozás, Hubble séma.

Áttekintjük a galaxisok morfológiai osztályozásának elvét, és fajtáit, példákat adunk a fontosabb morfológiai osztályokra.

A galaxisok fizikai tulajdonságai és főbb folyamataik meghatározásában első lépés a szerkezetük meghatározása és a megfigyelt morfológiai sajátosságok alapján történő osztályozás. A galaxisok osztályozása általában erősen korlátos információn alapul, mint például a B (kék) sávban megfigyelt morfológia. Az osztályozás nem mentes az elfogultságtól, hiszen azt a mérés szögfelbontása, az osztályozott galaxis felületi fényessége, luminozitása befolyásolja. Ráadásul, az osztályozás nem is mindig egyértelmű. Mint látni fogjuk ennek ellenére a morfológiai osztályozás hasznos, mert a megfigyelt szerkezet gyakran kapcsolatba hozható olyan alapvető fizikai tulajdonságokkal, mint például a sebesség diszperzió. A morfológia tehát elvezethet a galaxisok alapvető tulajdonságai kvantitatív leírásához.

A legegyszerűbb osztályozásnál a hasonló csoportokba kerülnek, de a csoportok között nincs reláció. William Parsons a 19. század derekán kézi rajzaival alátámasztva (lásd például 0.1. ábra) hívja fel figyelmünket bizonyos morfológiai jellemzők csoportos előfordulására (lásd 3.1. ábra, Parsons 1850). Ilyen egyszerű csoportosítást látunk a Wolf katalógusban is (lásd 1.4. ábra).

List of some remarkable Nebulae.

Spiral or curvilinear.

H. 142, 262, 327, 695, 749, 910, 1002, 1211, 1312, 1368, 1451, 1570, 1776, 2172.

With dark spaces.

264, 368, 491, 514, 692, 731, 788, 857, 887, 1107, 1225, 1909, 2241.

Ray with split.

1041, 1149, 1357.

Knotted nebulae.

84, 257, 320, 409, 446, 581, 1274, 1901.

3.1. ábra: „Néhány figyelemre méltó köd” – Parsons (1850) saját katalógusához fűzött megjegyzéseként olvasható az eredeti publikációban. <http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/140/499.full.pdf>

3.1 Hubble-Sandage osztályozás

A legelterjedtebben használt Hubble-Sandage osztályozás a korong-dudor (disk-to-bulge) arányt, a spirál karok nyílásszögét és a küllő (bar) meglétét/méretét figyeli. Alapja Hubble (1926) morfológiai osztályozási rendszere.

3.1.1. A Hubble-féle osztályok – „hangvilla”

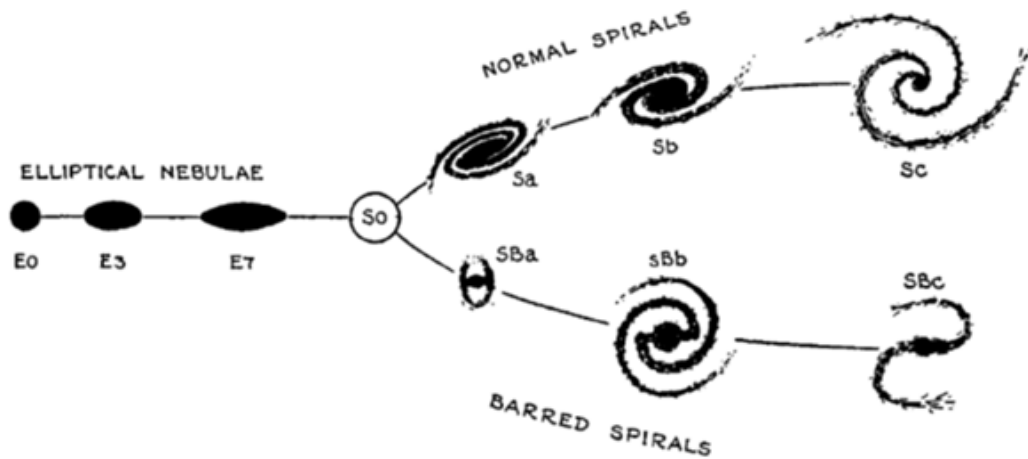
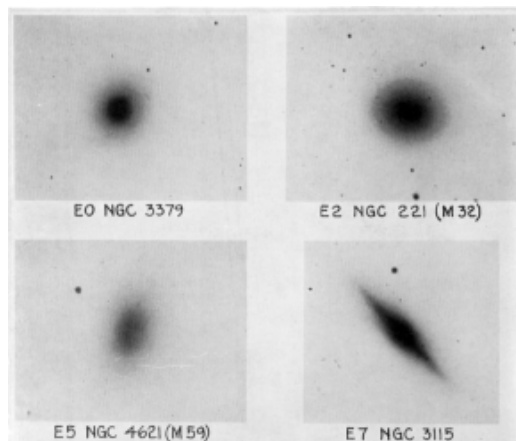
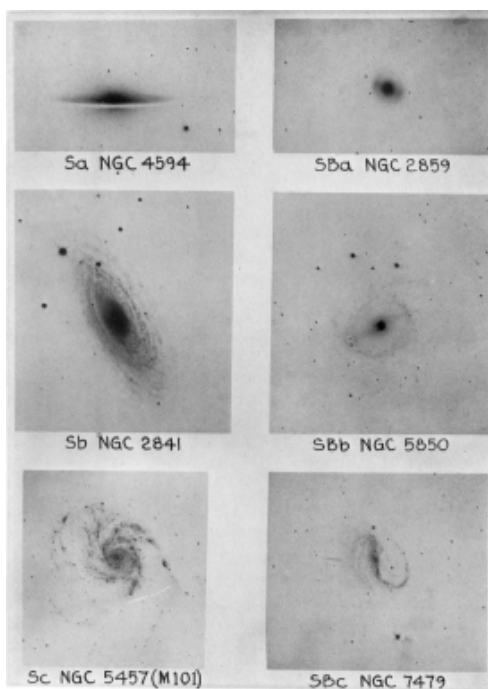


FIG. 1. *The Sequence of Nebular Types.*

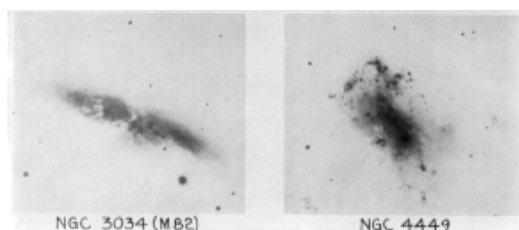
3.2. ábra: Az eredeti Hubble-féle osztályozás (Hubble 1926, Hubble 1936). Az osztályok: E(0-7), S0, Sa, Sb, Sc, Sd. Az Irr (irreguláris) osztályt nem tüntette fel a „hangvillán”. A hangvillát elsőként James Jeans használta a Hubble osztályok ábrázolására (Jeans 1928).



3.3.a ábra: Az eredeti Hubble-féle osztályozás (Hubble 1926) – elliptikus galaxisok.



3.3.b ábra: Az eredeti Hubble-féle osztályozás (Hubble 1926) – spirálgalaxisok.



3.3.c ábra: Az eredeti Hubble-féle osztályozás (Hubble 1926) – irreguláris galaxisok.

Az E(0-7), S0, Sa, Sb, Sc, Sd, Irr osztályokba soroláshoz 3 kritérium alapján értékelte a galaxisok látható tartományban (fotólemezekre) készített képeit:

- **Elsődleges:** a csillagkeletkezéssel összefüggésbe hozható kis skálájú csomósság jelenléte, vagy hiánya, a Hubble-skála ezért alapvetően a jelenlegi csillagkeletkezési aktivitás szerinti osztályozás. – Ez az a kritérium, ami szerint a galaxis a „hangvilla” nyelére, vagy „ágaira” kerül, azaz elliptikus ill. lentikuláris, vagy spirális.
- **Másodlagos:** dudor (bulge vagy spheroid) - korong (disk) arány (B/D). A központi dudor és a korong méretaránya – Ez a spirálgalaxisok fő osztályozási kritériuma.
- **Harmadlagos:** a spirálkarok tulajdonságai: feltekeredtségük és kontúrosságuk, vagy épp diffúz voltak

A harmadlagos kritérium pontosítható a következő paraméterekkel: eltérülési szög (pitch-angle PA, lásd később), kontúrosság (prominence), spirálkarok száma (number of spiral arms).

3.1.1.1. A típusok jellemzése I. - Elliptikus galaxisok:

Az elliptikus galaxisok (E_n , $n=1,2,3,4,5,6,7$) olyan objektumok, amelyek között vannak kör alakúnak látszó és egészen lapos, lencseszerű ellipszishez hasonló, nem bomlanak föl apróbb alkotóelemekre a legjobb felvételeken sem. Egyetlen jellemzőjük kis- és nagytengelyük méretének aránya, ami egy és egynegyed közötti érték lehet. Fényességük magjuktól távolodva egyenletesen csökken egészen a nehezen definiálható peremükig. Az elliptikus galaxisok lapultságát Hubble a következő formulával adta meg:

$$n = 10 \frac{a-b}{a} ; \quad (3.3)$$

ahol a és b a fotografikus felvételen az elliptikus galaxis tengelyei.

Az elliptikus galaxisokat luminozitásuk (vagy tömegük) alapján soroljuk normál, vagy törpe elliptikus kategóriákba, de felületi fényesség profiljuk is eltérő. Előbbiek de Vaucouleur's profilt, utóbbiak exponenciálist mutatnak. (A felületi fényesség profilokról a 8. fejezetben bővebben olvashatunk.)



3.4. ábra: M 87 E0 osztályú normál elliptikus galaxis



3.5. ábra: M 110 E6 osztályú normál elliptikus galaxis



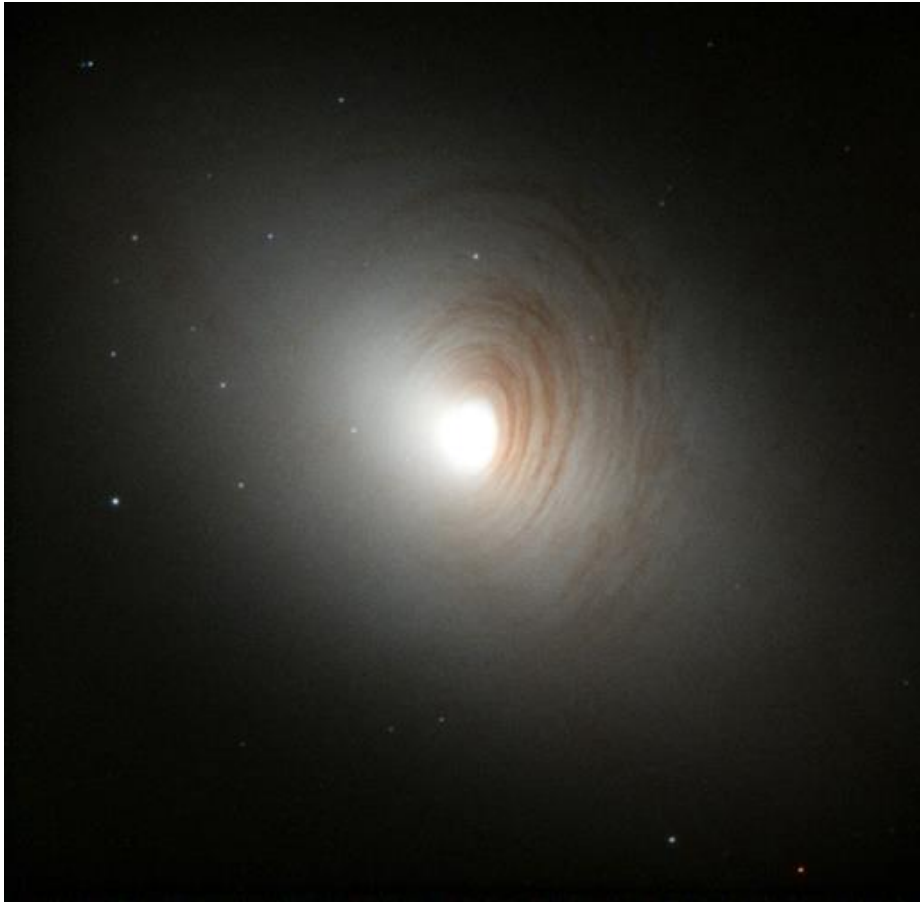
3.6. ábra: Normál elliptikusok (bal és közép) és egy törpe (jobb) elliptikus galaxis.

3.1.1.2. A típusok jellemzése II. – Lentikuláris galaxisok:

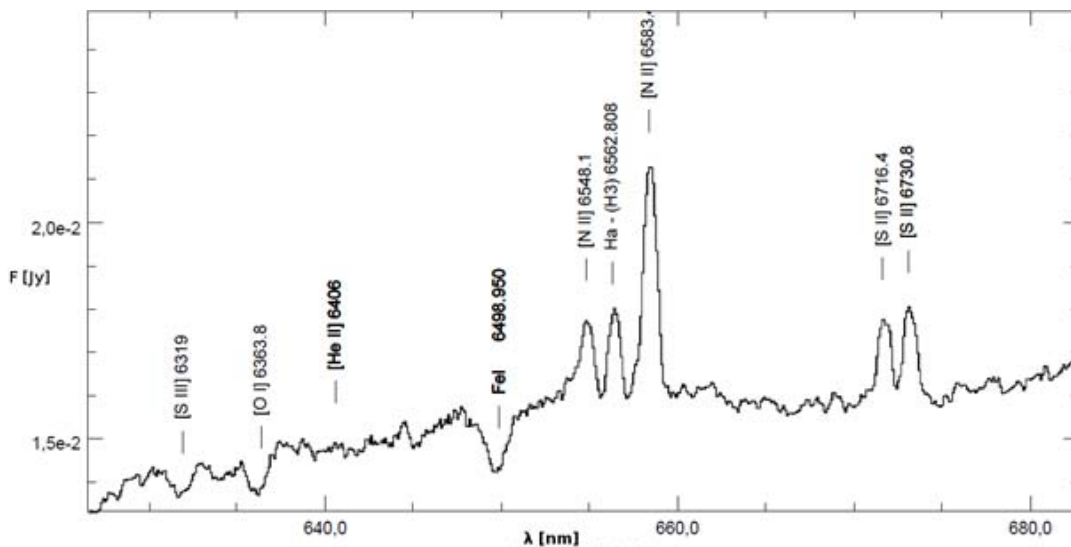
A lentikuláris vagy lencsegalaxisok átmenetet képeznek a spirálgalaxisok és az elliptikus galaxisok között. Van korongjuk (disk), de nem mutatnak jelentősebb csillagkeletkezést, a korongban nem látunk éles struktúrát. Jelentős a dudor (bulge), a B/D arány magasabb a spirálgalaxisokénál. Néhány további sajátosságuk, melyeket a Hubble osztályozásban nem vettek figyelembe: Nem jelentős a csillagközi anyag tartalmuk. Alacsony hideg csillagközi gáz tartalom mellett van példa poros sávokra. Sebesség diszperziójuk rendre magasabb, mint a hasonló luminozitású spirálgalaxisoknak. Olyan spirálgalaxisok lehetnek melyekben leállt a csillagkeletkezés és feloszlottak a spirálkarok. Az elliptikus galaxisokéihoz hasonló spektrális jellemzőik vannak, jobbra öreg csillagokból állnak.



3.7. ábra: Az NGC 4452 lentikuláris galaxis (S0) a Virgo galaxishalmazban. Kompozit kép HST WFPC2 szűrőkkel készített mérésekből, színekódolása: 475nm (kék); 814nm (vörös); a zöld sávban pedig a 475nm és 850nm-es fluxusok összege (ESA/Hubble & NASA 2010).



3.8. ábra: Az NGC 2787 különlegeslentikuláris galaxis (SB0), mely emissziós vonalakat mutat, úgynevezett *LINER* (low-ionization nuclear emission-line region), korongjában poros sávokkal. Kompozit kép HST WFPC2 szűrőkkel készített mérésekből, szinkódolása: a 450nm (kék); 555nm (zöld); 814nm (vörös). (Carollo 1999).



3.9. ábra: Az NGC 2787 SB0 LINER galaxis nukleuszának spektruma emissziós vonalakkal (Ho et al. 1995 nyomán az NED, Specview felhasználásával – lásd még 7.1. alfejezet).

3.1.1.3. A típusok jellemzése III. - Spirálgalaxisok:

A spirálgalaxisok Hubble szerint a következő osztályokba sorolhatók:

a) normális spirálok S

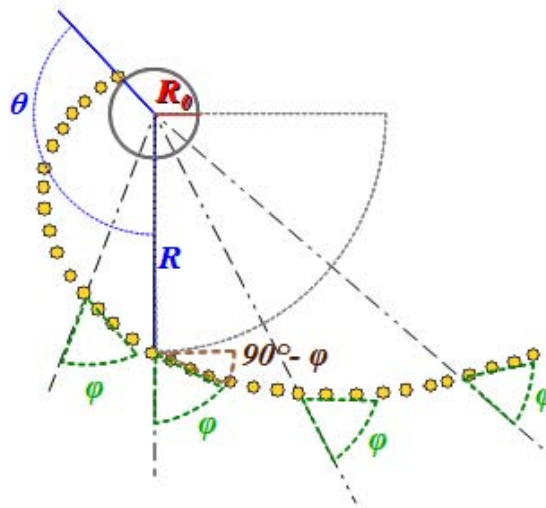
- korai Sa,
- átmeneti Sb,
- késői Sc,

Az átlagos eltérülési szög Sa-tól Sc-ig növekszik (lásd

A φ érintőszög a spirálgörbe egy pontjához a középpontból húzott sugár és az érintő hajlásszöge. A PA eltérülési szög, az érintőszög kiegészítő szöge: $PA = 90^\circ - \varphi$ megmutatja, hogy a spirál mennyire tér el a körtől. Az eltérülési szög az R galaktocentrikus távolság és a θ polárszög függvénye, logaritmikus spirálnál (mint a 3.3. ábrán) PA állandó. A logaritmikus spirál r és θ koordinátákkal felírt polárkoordinátás egyenlete:

$$\theta = \frac{1}{b} \ln \frac{r}{a} \qquad \text{az érintőszög a } b \text{ paraméterrel: } \phi = \arccotg(b) \quad (3.4)$$

Az a egy skálafaktor, a b paramétertől függ a feltekeredés iránya és érintőszöge. Például, ha $b=0$, akkor $\varphi = \pi/2$ és a görbe kör; ha $b \rightarrow \infty$, akkor $\varphi \rightarrow 0$ és a spirálból félegyenes lesz. Felhívjuk a figyelmet, hogy az eltérülési szöget több helyen, például az NED-ben is μ -vel jelölik.



3.10. ábra: A φ érintőszög a középpontból a spirál egy pontjához húzott sugár és a spirál érintőjének hajlásszöge. Az eltérülési szög (pitch-angle PA) az érintőszög kiegészítő szöge $PA = 90 - \varphi$. A eltérülési szög az R galaktocentrikus távolság és a θ polárszög függvénye, logaritmikus spirálnál (mint itt az ábrán) állandó.

b) küllős spirálok SB

- korai SBa,
- átmeneti SBb,
- késői SBc.

A küllős spirálok alosztályaiban a bulge a-tól c-ig csökkenő jelentőségű.



3.11. ábra: NGC 3223 Sa osztályú spirálgalaxis



3.12. ábra: M81 Sb osztályú spirálgalaxis

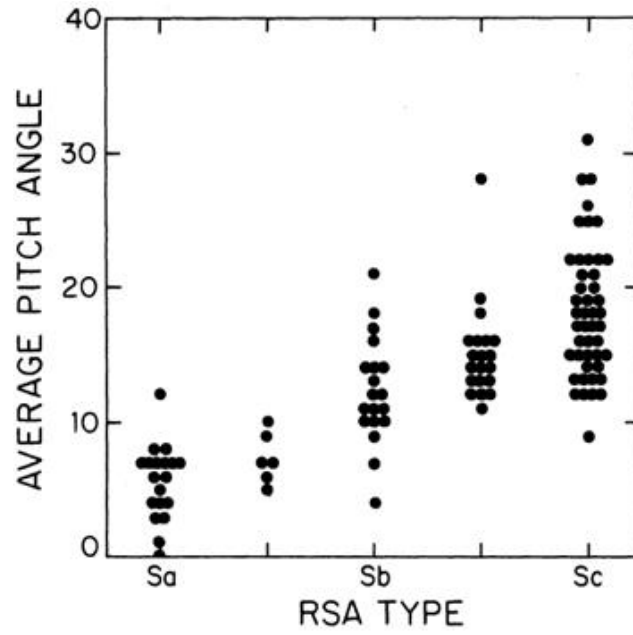


3.13. ábra: M101 Sc osztályú spirálgalaxis

A spirálkarok nehezebben felismerhetőek, ha éléről, vagy majdnem éléről látjuk a korongot, mint például a Sombrero galaxisban (3.14. ábra).



3.14. ábra: M104 (Sombrero galaxis) Sa osztályú spirálgalaxis



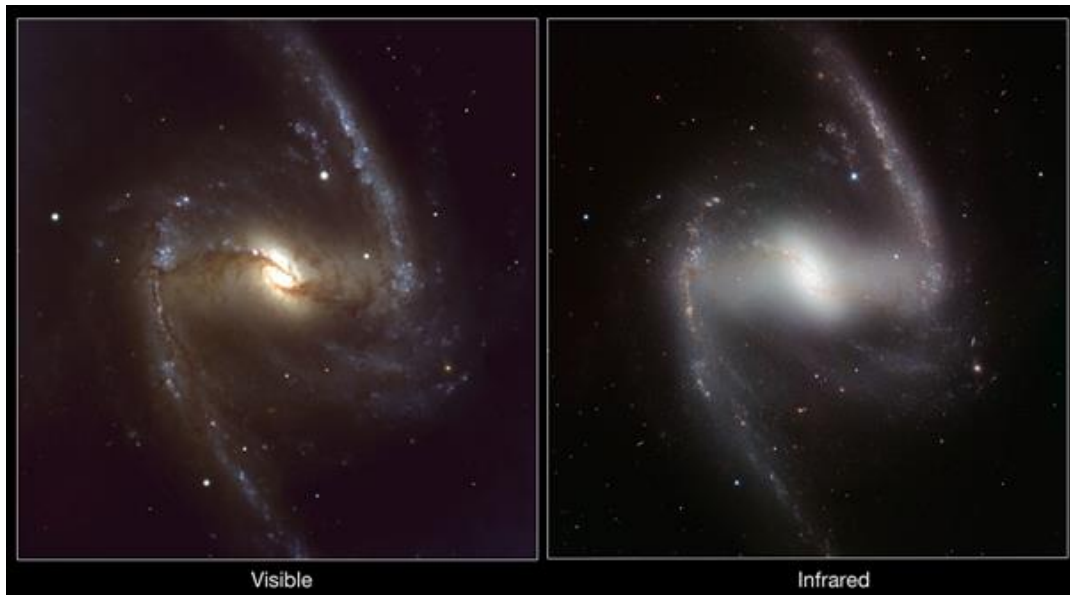
3.15. ábra: Az eltérülési szög (pitch angle) a Hubble típus függvényében (Kennicutt 1981).



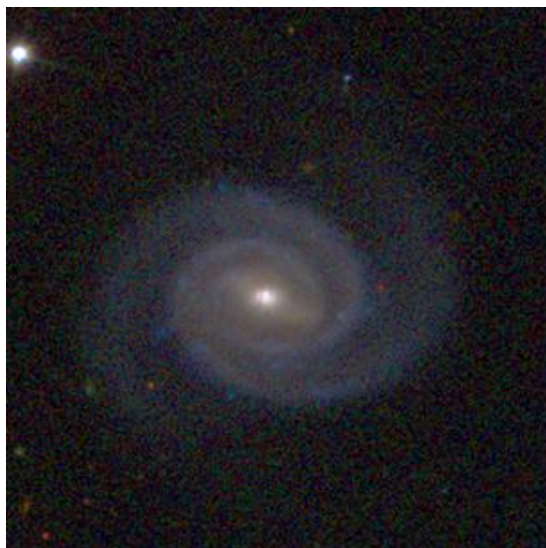
3.16. ábra: Az M83 SBa (küllös spirál) osztályú spirálgalaxis. A kompozit kép színekódolása: B (kék); V (zöld); R (vörös). (ESO/IDA/Danish 1.5 m/R. Gendler, S. Guisard (www.eso.org/~sguisard) and C. Thöne)



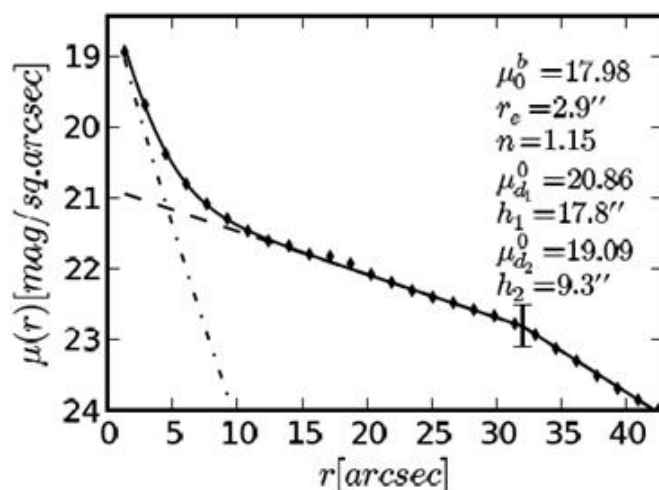
3.17. ábra: Az NGC2523 SB(r)b (küllös spirál) osztályú spirálgalaxis (jobb) és az NGC2523B normál spirálgalaxis. (NOAO, <http://www.noao.edu/outreach/aop/observers/n2523.html>)



3.18. ábra: NGC1365 SBc (küllös spirál) osztályú spirálgalaxis látható illetve infravörös képe. A kompozit képek színekódolása: B (kék); V (zöld); R (vörös), illetve Y (kék); J (zöld); H (vörös). Készült az ESO VLT FORS1 illetve HAWK-I kameráival. Az NGC1365 spektruma alapján Seyfert 2 típusú. (ESO/P. Grosbøl, 2010).



3.19. ábra: Az NGC 165 (PGC 2182) SBbc típusú galaxis SDSS g; r; i sávú kompozit képe (Bailard et al. 2011).



3.20. ábra: Az NGC 165 (PGC 2182) SBbc típusú galaxis felületi fényesség profilja 3 részre bontható: a nukleusz, illetve a korong és külső korong.

A spirálgalaxisok (3.3) egyenlet szerinti lapultsága nagy, $n > 7$. A spirálgalaxisok altípusai megkülönböztetésére nem elegendő tengelyeik hosszának arányát megállapítani, mert ez csak igen csekély mértékben változik. Meg kell vizsgálni azt, hogy a rendszer teljes egészéhez képest mekkora a tovább már nem bontható galaxismag mérete, hogy a spirálkarok mennyire vannak lecsavarodva, végül, hogy a karokban milyen a feloldás.

3.1.1.4. A típusok jellemzése IV. – Szabálytalan alakú galaxisok:

A szimmetriatulajdonságokkal rendelkező típusokba nem illeszthető, dudorral nem rendelkező galaxisok a szabálytalan, vagy más néven irreguláris osztályba kerültek. Ezekben a galaxisokban is megjelenhet a korongos galaxisokra jellemző szerkezeti elem, de szimmetriák nélkül. Ezek a galaxisok csillagközi anyagban (hideg gázban és porban is) gazdagok.

A Déli Féltekéről szabad szemmel is látható Kis és Nagy Magellán Felhő (SMC és LMC) törpe irreguláris galaxisok a Tejútrendszer szatellitái, azzal gravitációs kölcsönhatásban. Bennük, több komplexben (OB asszociációk és óriás molekulafelhők egysége) intenzív csillagkeletkezés folyik.



3.21. ábra: Nagy Magellán Felhő (LMC) irreguláris galaxis



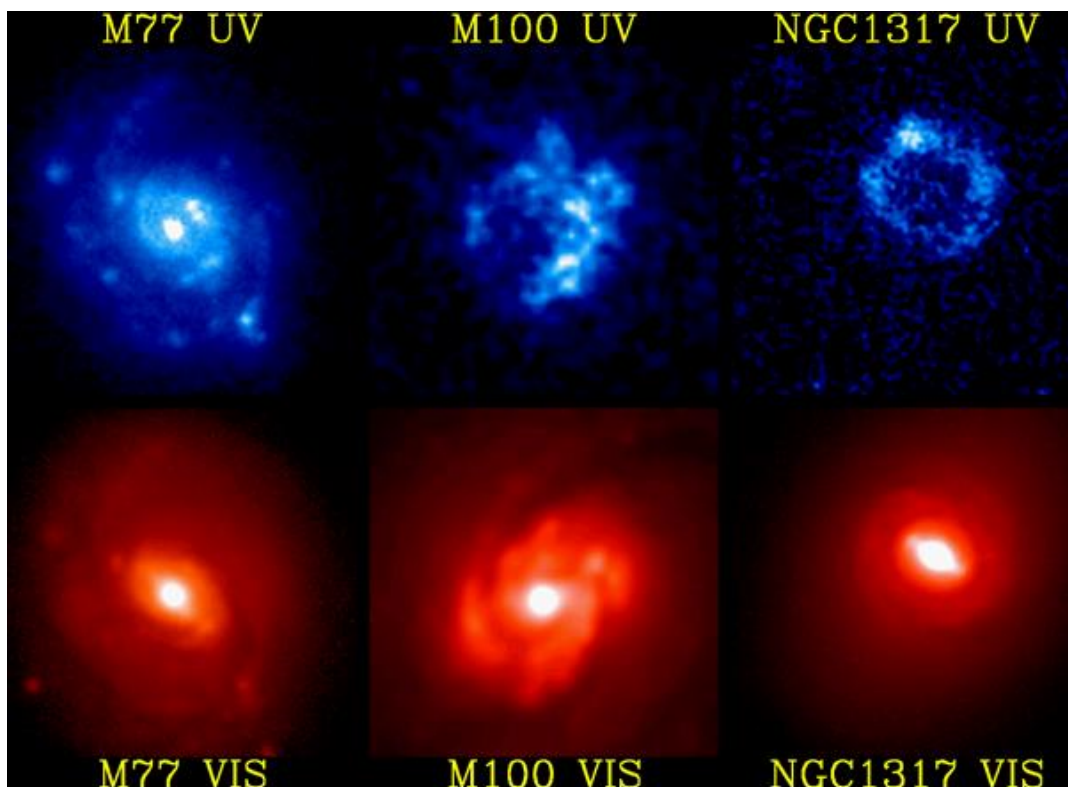
3.22. ábra: Kis Magellán Felhő (SMC) irreguláris galaxis

3.1.2. A Hubble-féle morfológiai osztályozás hiányosságai

(1) Egy erősen korlátos mintán alapul (kiválasztási effektusokkal terhelt). A közeli, nagyobb felületi fényességű galaxisok dominálnak.

(2) Fotografikus (lényegében kék sávú) képeken alapul, ezért a csillagkeletkezési területek eloszlása és nem a tömeg eloszlása határozza meg a látszó morfológiát. A megjelenés hullámhosszfüggő.

Nagyobb vöröseltolódás mellett az ultraibolya kép a látható tartományba „tolódik”, márpedig az ultraibolya felületi fényességeloszlása jelentősen eltérhet a kék sávban mérhetőtől.



3.23. ábra: Három csillagotó galaxis az M77, M100 és NGC1317 ultraibolya (fent) és látható (lent) képei. A látszó morfológia jelentősen eltér. Ha a vöröseltolódás miatt a látható tartományban a nyugalmi ultraibolya képet látjuk, a morfológiai osztályozás téves lesz.

3.1.3. A Hubble-féle osztályozás finomításai

A Hubble által kidolgozott felosztás később több helyen is szűknek bizonyul, amikor egyre több fotót készítettek (SA katalógus, NGS-POSS-fotók). Éppen ezért az eredeti séma több egyszerű finomítása is megszületett. A legfontosabbakat röviden áttekintjük.

3.1.3.1. de Vaucouleurs rendszere:

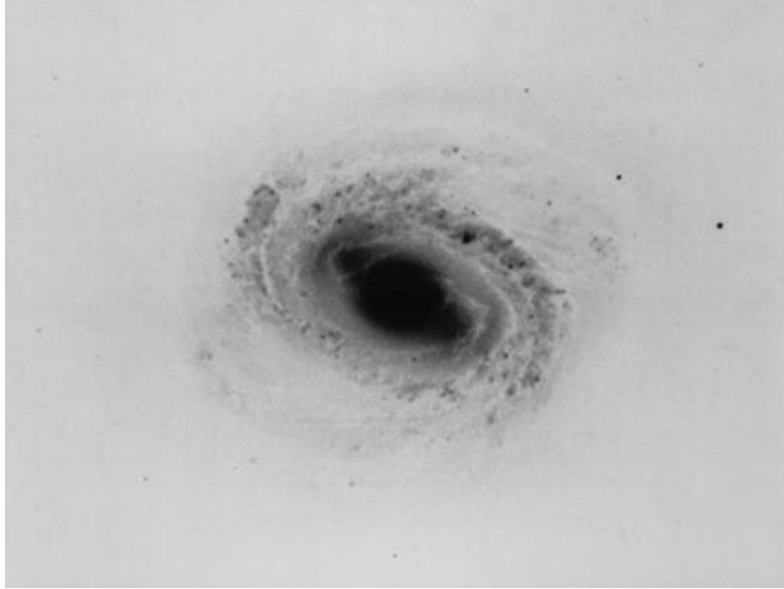
Gérard de Vaucouleurs egy 3 dimenziós, azaz 3 paraméteres jellemzésen alapuló (stage, family, variety) felosztással. A három paraméter tengely mentén elkülönülnek a: korai-késői; küllős-nem küllős; belső gyűrűs – gyűrűtlen galaxisok. Mind az elliptikusok, mind a spirálok esetében más beosztást alkalmazott, mint Hubble (E, E+, S0-, S00, S0+, Sa, Sab, Sb, Sbc, Sc). Az Sc típus egy inhomogén csoportot jelölt, további átmeneti altípusokra volt szükség a szabálytalan rendszerek felé. Így került sor az Scd, Sd, Sdm, Sm és Im alosztályok bevezetésére. Ezzel lényegében meghosszabbította a spirális ágat az egyre kaotikusabb szerkezetektől az irregulárisig. Ezt a sorozatot a morfológia de Vaucouleurs szerinti T indexét bevezetve is felírhatjuk (lásd 3.1. táblázat).

Típus	E	E+	S0 ⁻	S0 ⁰	S0 ⁺	S0/a	Sa	Sab	Sb	Sbc	Sc	Scd	Sd	Sdm	Sm	Im
T	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

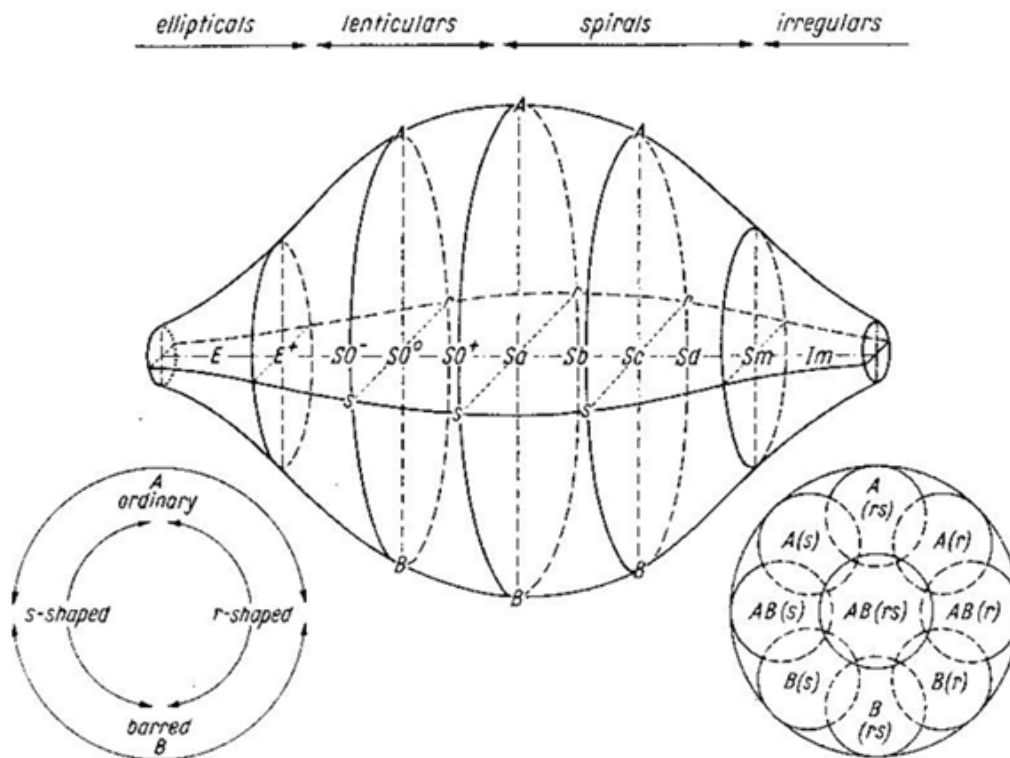
3.1. táblázat: A morfológia de Vaucouleurs szerinti T indexe

Néhány spirálgalaxis az egyszerű és küllős spirálok sajátosságait is mutatja, mint például az NGC4579, melyet Hubble és Sandage az Sb/SBb jelölésű átmeneti osztályba sorolt. de Vaucouleurs az egyszerű spirálgalaxisok „S” jeléhez „A”-t adott a küllősökhöz „B”-t, az átmeneti típusok pedig az „AB”-t kapták, a domináns jelleg betűjelét

aláhúzással megjelölve. Az NGC4579 de Vaucouleurs-nél „SABb” típusú, és mert kék sávú felvételein a küllő nem dominált, inkább normál spirálnak tűnt, ezért típusában az „A”-t aláhúzta. természetesen a küllős spirálok esetében is ugyanilyen módon és sorrendben kerültek be a rendszerbe. Fontos újítás de Vaucouleurs-nél a gyűrűk megjelenése a galaxisok klasszifikációjában. A küllős spirálokat de Vaucouleurs a karok kezdetének geometriája szerint is osztályozta. Az „r” típusúak, melyeknél a spirálkar a küllő körüli gyűrű érintőjeként indul, mint az NGC2523-nél (3.17. ábra). Az „s” típusúaknál pedig mintegy a kar folytatásaként, és így a galaxis képe egy S betűre emlékeztet, erre példa az NGC1300.



3.24. ábra: Az NGC 4579 SAB(rs)b morfológiai típusú Seyfert galaxis B sávú képe 103 aO fotólemeze WG 2 (ultraibolya tartományt levágó) szűrővel (Sandage & Bedke 1994, <http://ned.ipac.caltech.edu/img6/1994CAG1..B...0000S/ngc4579:I:103aO+WG2:s1994.jpg>)



3.25. ábra: A de Vaucouleurs klasszifikáció (Sandage el al. 1975)

A de Vaucouleurs rendszert találjuk a „*Reference Catalogue of Bright Galaxies*” atlasz sorozatban: RC1 (1964), RC2 (1976), and RC3 (1991) rendre 2600, 4364, és 23,024 galaxissal.

Table 2. Coding of revised morphological types.

Classes	Families	Varieties	Stages	T	Type	Code
Ellipticals		Compact “cD”	Ellipt. (0-6)	-6	cE	cE...
			Intermediate	-5	E0	.E.0.
				-5	E0-1	.E.0+
				-4	E+	.E+..
Lenticulars	Non-barred Barred Mixed	Inner ring S-shaped Mixed	Early Intermediate Late		S0	.L
					SA0	.LA
					SB0	.LB
					SAB0	.LX
					S(r)0	.L.R
					S(s)0	.L.S
					S(rs)0	.L.T
					S0 ⁻	.L...-
					S0 ^o	.L..0
					S0 ⁺	.L...+
Spirals	Non-barred Barred Mixed	Inner ring S-shaped Mixed	0/a a ab b bc c cd d dm m		SA	.SA
					SB	.SB
					SAB	.SX
					S(r)	.S.R
					S(s)	.S.S
					S(rs)	.S.T
					S0/a	.S..0
					Sa	.S..1
					Sab	.S..2
					Sb	.S..3
					Sbc	.S..4
					Sc	.S..5
					Scd	.S..6
					Sd	.S..7
	Sdm	.S..8				
	Sm	.S..9				
Irregulars	Non-barred Barred Mixed	S-shaped Compact	Non-Magellanic Magellanic		IA	.IA
					IB	.IB
					IAB	.IX
					I(s)	.I.S
				90	I0	.I.0
				10	Im	.I..9
	11	cI	cI			
Peculiarities			Peculiarity	99	Pec	.P
(All types)			Uncertain		pecP
			Doubtful		:*
			Spindle		??
			Outer ring		sp /
			Pseudo-outer R		(R)	R.....
					(R')	P.....

3.2 táblázat: de Vaucouleurs osztályozási rendszere (de Vaucouleurs).

3.1.3.2. Yerkes-Morgan osztályozás

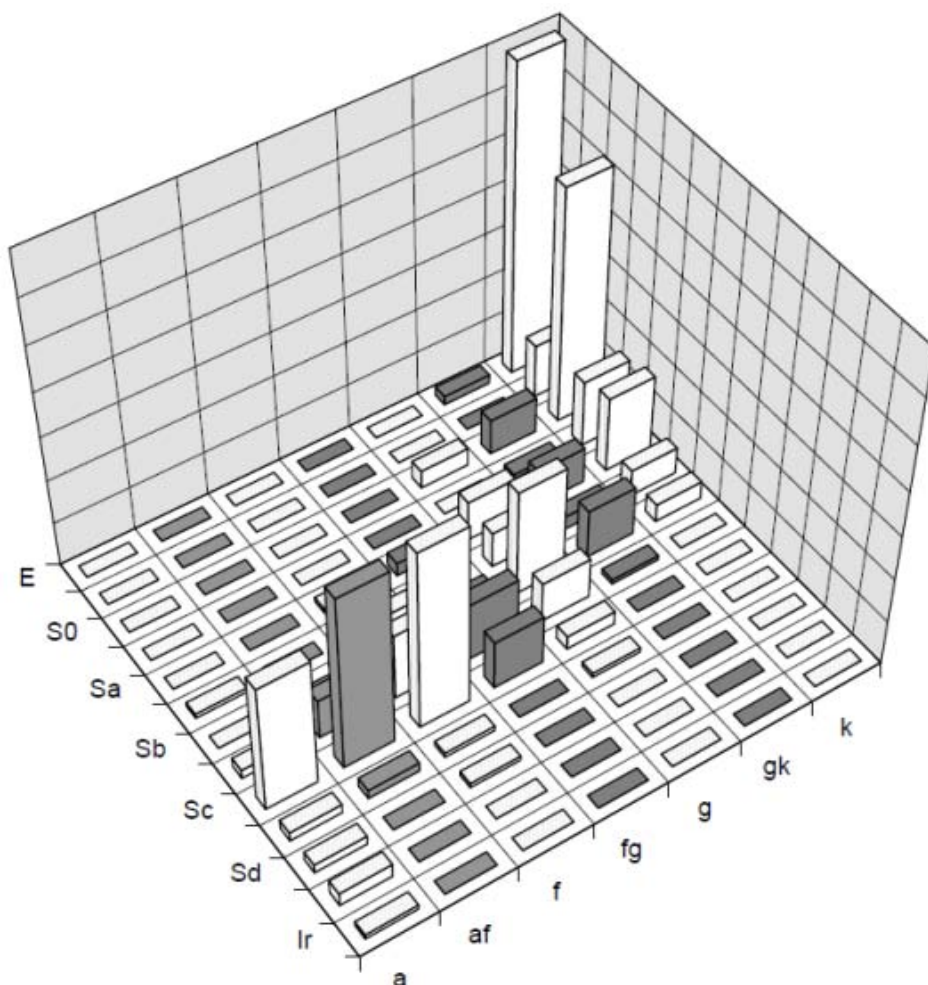
William Wilson Morgan olyan osztályozást javasolt (Morgan 1958), amely a morfológiai tulajdonságok mellett a galaxisok színképét is figyelembe veszi. Az elsődleges osztályozási paraméter a csillagtartalom alapján a-tól k-ig azon a korreláción alapul, amit Morganék a galaxis közepén jelentkező csillagkoncentráció mértéke és a színkép között találtak (Morgan & Mayall 1957). Azt tapasztalták, hogy a kisebb centrális felületi fényesség koncentrációt

mutató irreguláris és spirális galaxisok rövid hullámhosszú (ibolya) fényét B, A és F típusú csillagok dominálják, míg a fényes „magot” magukba foglaló óriás elliptikusokét a K óriások. Az a-tól k-ig terjedő betűk eredetileg az A-F Morgan-Keenan-féle spektrális osztályok (Morgan et al. 1943 és Morgan & Keenan 1973) jelentős előfordulására utalnak, de a közreadott osztályozás morfológiai, a centrális felületi fényesség koncentráción alapul.

A Yerkes-osztályozás másodlagos paramétere, a *forma család* (form family) 11 értéket vehet fel. A Hubble-féle rendszerben használatos 4 fő formai osztályt kiegészítette 7 továbbival Ep, D, L, N (Morgan 1958), valamint cD, db, Q (Morgan 1959):

- **S**: spirálgalaxis
- **B**: küllős spirál
- **E**: elliptikus galaxis
- **I**: irreguláris galaxis
- **Ep**: elliptikus galaxis abszorpciós foltokkal
- **D**: forgásszimmetrikus galaxis spirális vagy elliptikus szerkezet nélkül,
- **cD**: szuperóriás D galaxisok, elsősorban halmazokban található
- **db**: D galaxis dupla nukleusszal
- **L**: feltűnően kis felületi fényességű galaxis
- **N**: fényes maggal és halvány burokkal rendelkező galaxis
- **Q**: csillagszerű objektum

Morgan bevezetett egy harmadik paramétert is, az *inklinációs osztályt* (inclination class). Ez a galaxisok fő szimmetriásíkjának a látóvonallal bezárt szögét 1-7-ig terjedő számokkal jelzi (lényegében feltéve, hogy a lapultságot az inklináció okozza), ahol 1 a látóvonatra merőleges szimmetriásíkot jelent (ez a kör alakú), a 7 pedig erősen lapult ellipszist (Morgan 1958).



3.26. ábra: A Hubble-Sandage és a Yerkes (Morgan) osztályozás összehasonlítása. Az ábra jól mutatja, hogy a Yerkes rendszer nem bontja fel a Hubble-féle E-S0-Sa típusokat, illetve, hogy a Hubble-féle Sc spirálisok központi fényesség gradienseiben nagy különbségek vannak. (van den Bergh, <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/9703164.pdf>)

3.1.3.3. A Van den Bergh-féle osztályozási rendszer (DDO rendszer)

A Van den Bergh-féle osztályozási rendszer elsődleges kritériuma is a csillagkeletkezés, és fiatal csillagok jelenléte miatti strukturáltság. Ezen kívül figyelembe veszi a küllő jelenlétét, centrális fényesség koncentráció mértékét és a luminozitási osztályokkal is finomít. Az Sb osztályokat 5 luminozitási osztályra bontotta (I, I-II, II, II-III, and III), az Sc-Irr rendszereket nyolcra (I-től V-ig az átmeneti luminozitási osztályokkal együtt). A spirálgalaxisok luminozitási osztályait igazából a karok meghatározottsága szerint állította fel, de valós abszolút fényesség különbségeket mutatnak a csoportok (lásd 3.3. táblázat). A „DDO” elnevezés a *David Dunlap Observatory*-ra utal Kanadában, ahol Van den Bergh dolgozott.

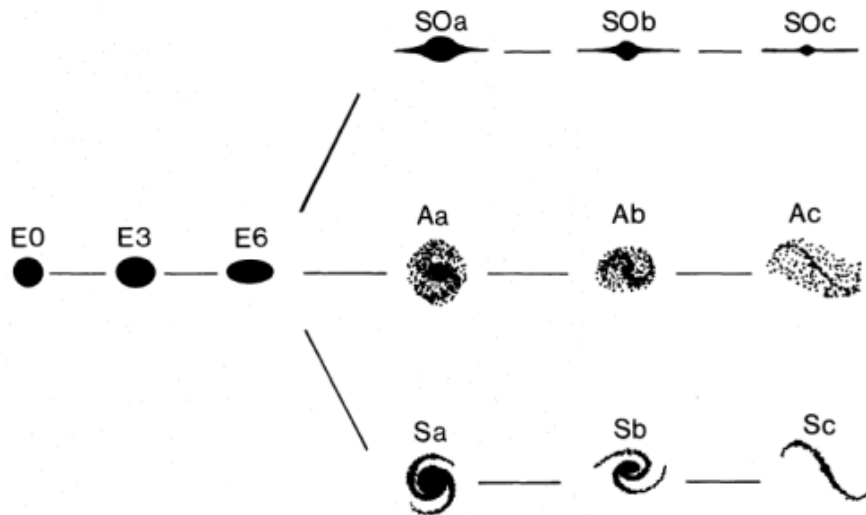
Galaxis típus luminozitási osztállyal	M_{pg}
SbI	-20.4
SbI-II	-19.9
SbII	-19.4
SbII-III	-18.6
SbIII	-18.0
ScI	-20.0
Sc I-II	-19.7

Sc and Irr II	-19.4
Sc and Irr II-III	-18.9
Sc and Irr III	-18.3
Sc and Irr III-IV	-18.0:
Sc and Irr IV	-17.3:
Sc and Irr IV-V	-16.1:

3.3. táblázat: Van den Bergh-féle osztályok és fotografikus abszolút fényességek

Van den Bergh az irreguláris galaxisokat beillesztette a Hubble „hangvilla” csúcsaira a küllős irregulárisakat (mint például az LMC) az SBc küllős spirálokhoz kapcsolva, a „normál” irregulárisokat (mint például az IC 1613) pedig a nem küllős spirálgalaxisok Sc osztálya után (van den Bergh 1975).

Egy következő korrekciójában pedig a spirálgalaxisokat két ágra bontotta: a normál spirálgalaxisok (normal spirals) és a „vérszegény” spirálgalaxisok (anemic spirals). Az elve az volt, hogy a lencse alakú galaxisok nem mutatnak fiatal I. populációs csillag csoportokat, sem csillagközi gázt és aktív csillagkeletkezésre utaló jeleket, a spirálgalaxisok gázban gazdagok, és a kettő közötti lapult rendszerek, melyek átmenetet képeznek a „vérszegény” (anemic) spirálok.



3.27. ábra: A van den Bergh féle „3 ágú hangvilla” (van den Bergh 1976). A lentikuláris galaxisok és a normál spirálgalaxisok között az új osztály, a „vérszegény” (anemic) spirálok .

3.1.3.4. A Hubble-Sandage séma:

Az úgynevezett Hubble-atlaszt Allan Sandage, Hubble munkatársa közölte le Hubble halála után. Ebben az eredeti felosztáshoz képest 3 finomítás szerepel. Az E7-es típusúak és a rendes spirálok közé beiktatta az S01, az S02 és az S03 típusúakat, továbbá két átmeneti típust is, az S03/Sa(r) és az S02/Sa(s) jelűket.

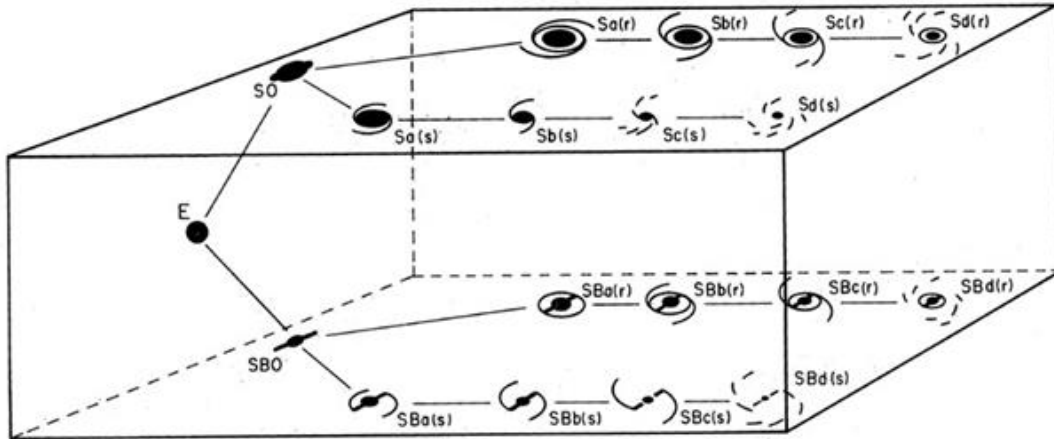
Az S0 és az SB0 alosztályainak jellemzői Marik (1989) szerint :

- S01: Átmenet a leglapultabb elliptikus és a lencseszerű galaxisok között, magjuk lapos, felületi fényességük folytonosan változik. A magot korong alakú, lapos, nagy kiterjedésű burok veszi körül.
- S02: A még folytonos fényesség-eloszlású burokba sötét, gyűrűszerű abszorpciós szalag ágyazódik.
- S03: Magjukat határozott sötét gyűrű választja el a korongtól. Ha élével látjuk, akkor is könnyen felismerhető, mert egy, a magot szinte kettéhasítani látszó sötét sávot figyelhetünk meg.
- SB01: a magot övező lapos korongjában a küllő egy széles, diffúz, a korong többi részénél fényesebb sáv.
- SB02: a küllők rövidebbek, nem kötik össze a magot az azt övező korong külső peremével.

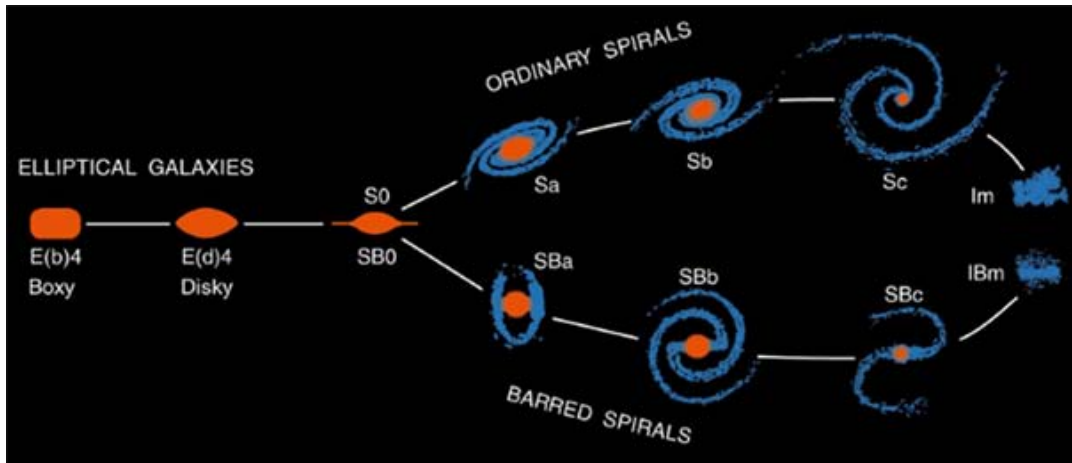
- SB03: jól kivehető, élesen kirajzolódó, keskeny, a korong egyik peremétől a magon át a másik pereméig húzódó küllő jellemzi.

3.1.3.5. A Hodge, Kormendy-Bender finomítások:

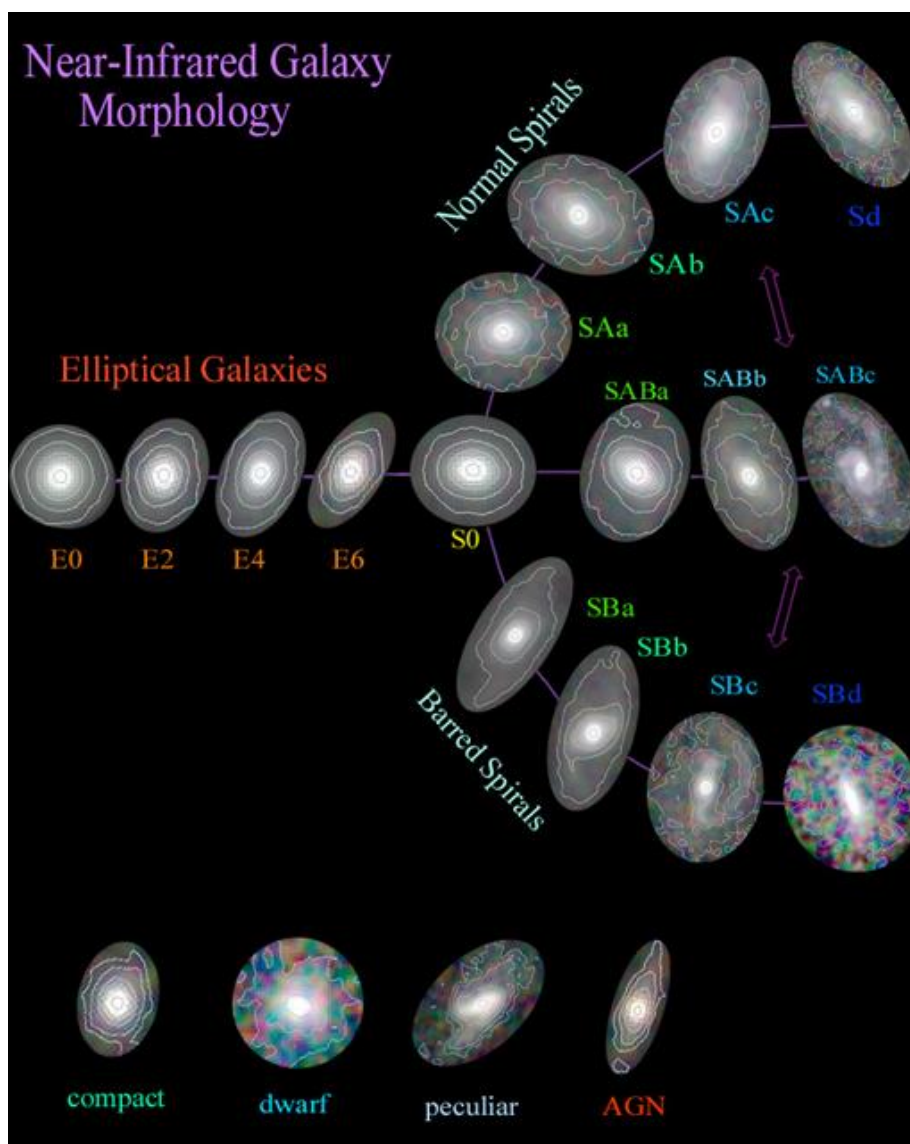
Megemlítjük továbbá a Hodge-tól származó úgynevezett kettős hangvillát, valamint Kormendy és Bender finomítását az elliptikus galaxisok morfológiai leírására.



3.28. ábra: A „dupla hangvilla diagram”. Hodge egy 3 dimenziós ábrában felfűzte a de Vaucouleurs osztályokat, szemléltető ikonokkal együtt (Hodge 1966). Csak az irregulárisok hiányoznak a jobb oldalon.



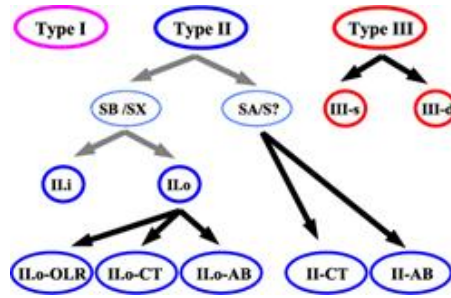
3.29. ábra: A galaxisok sferoidális komponense felületi fényesség eloszlása szerinti osztályozással egy újabb finomítás tehető. Ez bevezeti az elliptikus galaxisoknál a „szögletes” és „kerekded” („boxy” és „disky”) formákat (Kormendy & Bender 1996).



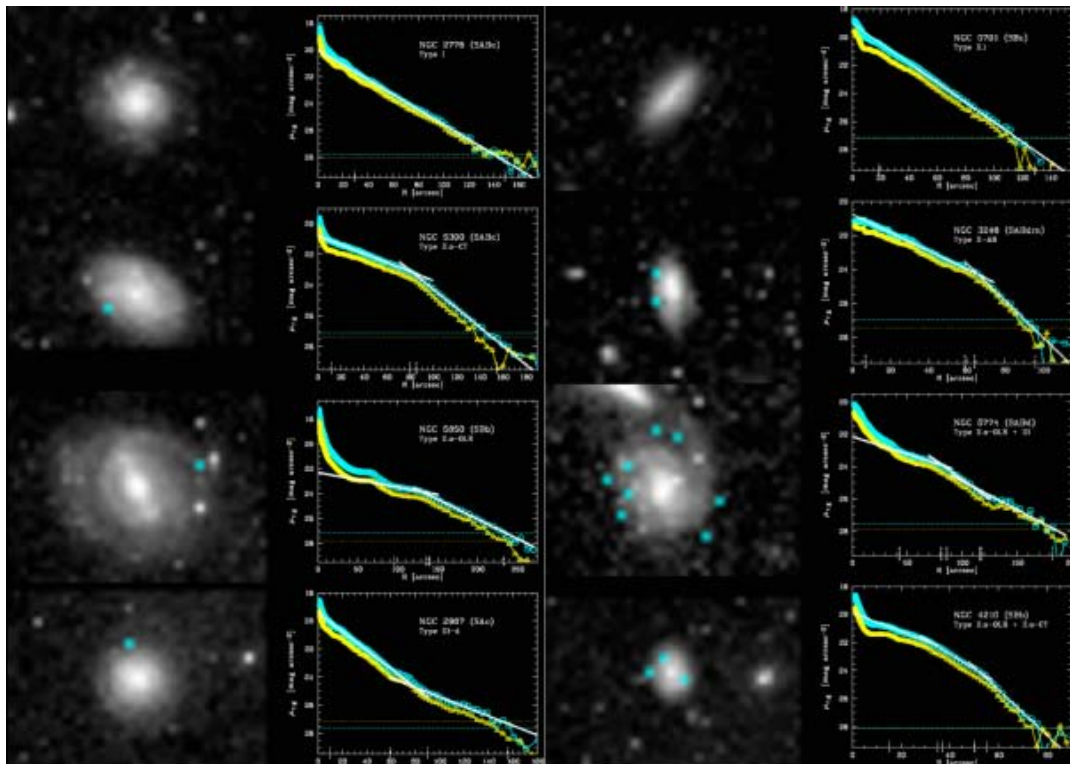
3.30. ábra: Reprezentatív példa galaxisok a Hubble „hangvilla” osztályaira 2MASS (Two Micron All Sky Survey) közeli-infravörös felvételeikkel. (Jarret <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/gallery/galmorph/>)

3.1.3.6. Korong típusok az SDSS felmérés alapján

A felületi fényesség profilok is alkalmasnak látszanak a korongos galaxisok morfológiai osztályozásra. Freeman (1970) elkülönítette a profilokban a központi sferoidális rendszer és az exponenciális diszk (lásd 5.1. alfejezet) komponenseket, és kimutatta, hogy az exponenciális diszk külső „szélén” sok korongos galaxisnál egyfajta letörés (truncation) látszik a profilban. Az SDSS felmérésben (lásd Függelék) nagy és közepes inklinációval észlelt 85 spirálgalaxis morfológiai klasszifikációját vetette össze Pohlen & Trujillo (2006) az intenzitás eloszlásokkal. Ez alapján kimutatták, hogy 3 korong profil változat létezik: I osztályú – törés nélküli; II. osztályú – letöréssel, azaz nagyobb meredekségű exponenciális profillal a korong külső részén (az I és II korábban is ismert volt) valamint a III. osztály ahol a törés után (azaz a külső korongban) a profil nem meredekebb, hanem lankásabb, mint az NGC2967-é az 5.32b ábra bal alsó részén. A korong profilokban a küllő, illetve a külső gyűrűk kis hullámokként jelentkeznek.



3.32. a) **ábra:** Az SDSS felmérés a korongos galaxisokat az ábra szerinti alosztályokba sorolta, a 3.32. b) profiljaik szerint (Pohlen & Trujillo 2006).



3.32. b) **ábra:** A korongos galaxisok alosztályainak képviselői. Az r' sávú képek mellett a g és r' sávú intenzitás eloszlások (Pohlen & Trujillo 2006). A profilokban nem illesztették a sferoidális alrendszer (bulge – az NGC3246 kivételével minden itt ábrázolt galaxisnál) profilját.

3.1.4. A Hubble osztályozásba nem illeszthető galaxisok

- törpe galaxisok: dE törpe elliptikus és dSp törpe sferoidális galaxisok; BCD kék kompakt galaxisok
- cD (Yerkes osztályozás szerint): c (nagyon nagy) és D (diffúz) galaxisok, melyeket galaxis halmazok közepében találjuk
- alacsony felületi fényességű korongos galaxisok (LSB)
- aktív galaxisok
- kölcsönható galaxisok és csillagontók

3.2. A morfológiai osztályozási sémák összehasonlítása

A fontosabb morfológiai osztályozások Hubble (1936), Hubble-Sandage (1961-95), de Vaucouleurs (1959), van den Bergh (1960/66), Yerkes (Morgan, 1957-1970) alapjait a 3.4. Táblázatban hasonlítjuk össze.

Osztályozási rendszer és referencia	osztályozás kritériumai	Osztályok jelölése
Hubble-Sandage (Sandage, 1961-1995)	küllősség (barrishness) spirálkarok nyílásszöge, korong-dudor arány degree of resolution of arms into stars	E, S0, S, SB, Irr a, b, c
De Vaucouleurs (de Vaucouleurs 1959)	küllősség (barrishness) spirálkarok nyílásszöge, korong-dudor arány gyűrűk, vagy S alakok	E, S0, S, SA, SB, I a, b, c, d, m (r), (s)
Yerkes (Morgan, 1958-1970)	fényesség gradiens a középpont felé küllős/homogén (barrishness/smoothness)	k, g, f, a E, R, D, S, B, I
DDO (van den Bergh 1960-1976)	fiatal csillagok jelenléte a korongban küllősség (barrishness) fényesség gradiens a középpont felé karok hossza és meghatározottsága	E, S0, A, S, Ir B a, b, c I, II, III, IV, V

3.4. Táblázat: Morfológiai osztályozások és osztályok összehasonlítása

Példák az egyes morfológiai osztályokra:

Az **M87** Hubble-Sandage osztálya: E1, De Vaucouleurs osztálya: E1P, Yerkes osztálya: kE1, DDO osztálya: E1

Az **M31** Hubble-Sandage osztálya: Sb, De Vaucouleurs osztálya: SA(s)b, Yerkes osztálya: kS5, DDO osztálya: Sb I-II

Az **LMC** Hubble-Sandage osztálya Irr I, De Vaucouleurs osztálya: SB(s)c, Yerkes osztálya: afI2, DDO osztálya: Ir III-IV

3.3. Fizikai paraméterek és szerkezet kapcsolata

1. Bulge-korong arány (bulge-to-disk ratio): A $\gamma = L_B / L_D$ a bulge és a korong luminozitásának aránya jelentősen változik S0/Sa: $5 < \gamma < 0,3$; Sb: $1 < \gamma < 0,1$; Sc/Irr: $0,2 < \gamma < 0$.

2. A spirálkarok nyílásszöge (opening angle of spiral arms): Sa: 0° -tól 10° -ig; Sb: 5° -tól 20° -ig; Sc: 10° -tól 30° -ig

3. Teljes csillagtömeg (stellar mass): az irregulárisoktól: ($10^8 M_\odot$) az elliptikusokig ($10^{12} M_\odot$) növekszik

4. Tömegegységre vetített perdület (specific angular momentum): az elliptikusoktól a spirálisok felé növekszik

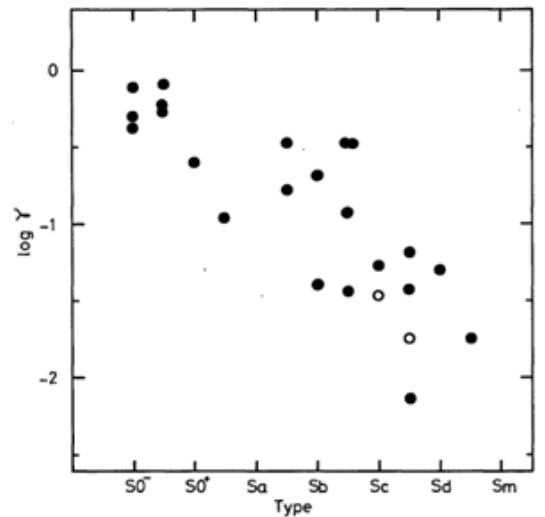
5. A csillagtartalom átlagéletkora (mean age): az irregulárisoktól a spirálisokon át az elliptikusok felé növekszik

6. A szferoidok átlagos csillagsűrűsége (mean stellar density of spheroids): csökkenő szferoid luminozitással növekszik

7. A korongok átlagos felületi fényessége (mean surface brightness of disks): a luminozitással növekszik

8. Hideg gáz tartalom (cold gas content): A Hubble sor mentén nő. A hideg gázban lévő barionikus tömeg hányad: E/S0: 0; Sa-tól Sc-ig 0,1-től 0,3-ig; Irr: 0,9-ig.

9. Forró gáz tartalom (hot gas content): elliptikusoknál néhány %



3.32. ábra: A bulge-korong arány és a morfológiai osztály kapcsolata. A luminozitások arányának logaritmusát a Hubble típus függvényében ábrázoljuk. (Yosizawa & Wakamatsu 1975)

Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:

Bailard, A. 2011: „*The EFIGI catalogue of 4458 nearby galaxies with detailed morphology*”, [A&A...532A..74B](#)

Bergh, van den. 1960: *Ap. J.*, 131, 215.

Buta, R. J., “*Galaxy Morphology*” arXiv:1304.3529 [astro-ph.CO] AL-13-01,
<http://inspirehep.net/record/1228173/plots>

de Vaucouleurs, G., 1959: *Classification and Morphology of External Galaxies*, Handbuch der Physik, Volume 53, p.275

Elmegreen, D. et al. 2002: „*Arm Structure in Anemic Spiral Galaxies*”, [AJ....124..777E](#)

Freeman, K.C. 1970: „*On the Disks of Spiral and so Galaxies*”, [ApJ...160..811F](#)

Ho, L.C. et al 1995: „*A search for "dwarf" seyfert nuclei. II. An optical spectral atlas*”, [ApJS...98..477H](#)

Hodge, P.W. 1966. „*The Physics and Astronomy of Galaxies and Cosmology*”, New York: McGraw-Hill Book Co.

Holmberg, E. 1958, *Medd. Lund. Ast. Obs. Ser. II*, 136.

Hubble, E.P., 1926: „*Extragalactic nebulae.*”, [ApJ....64..321H](#)

- Hubble, E.P., 1929:** „*A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae*”, [CoMtW...3...23H](#)
- Hubble, E., 1936:** „*The Realm of the Nebulae*”, Dover Publications Inc.
<http://archive.org/details/TheRealmOfTheNebulae>
- Jarrett, T.H, Chester, T., Cutri, R., Schneider, S., & Huchra, J. 2000:**
<http://www.ipac.caltech.edu/2mass/gallery/galmorph/>
- Jeans, J. H. 1927:** „*The Genesis of the Great Nebulae*”, [Natur.119..315J](#)
- Jeans, J. H. 1928:** „*Astronomy and cosmogony*”, University Press
- Keel, B. 2009:** „*Galaxy Classification*”, <http://www.astr.ua.edu/keel/galaxies/classify.html>
- Kormendy J., & Bender R., 1996:** ApJ, 464, L119
- Marik, M., 1989:** „*Csillagászat*”, Budapest, Akadémiai kiadó
- Morgan, W. W. 1958:** „*A Preliminary Classification of the Forms of Galaxies According to Their Stellar Population*”, [PASP...70..364M](#)
- Morgan, W. W. & Keenan, P. C. 1973:** „*Spectral Classification*”, [ARA&A..11...29M](#)
- Morgan, W. W. et al. 1943:** „*An atlas of stellar spectra, with an outline of spectral classification*”, [QB881.M6.....](#)
- Morgan, W. W. & Mayall, N. U. 1957:** Pub. AS.P., 69, 291.
- Morgan, W. W. 1958:** „*A Preliminary Classification of the Forms of Galaxies According to Their Stellar Population*”, [PASP...70..364M](#)
- Morgan, W. W. 1959:** „*Preliminary Classification of the Forms of Galaxies According to Their Stellar Population. II*”, [PASP...71..394M](#)
- Morgan, W. W. & Osterbrock, D. E., 1969:** *On the Classification of the Forms and the Stellar Content of Galaxies*, *Astronomical Journal*, Vol. 74, p. 515
- Parsons, W. (Lord Rosse) 1850:** „*Observations on the Nebulae*”, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 140, 499–514.
<http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/140/499.full.pdf+html?sid=b88c8dc8-0e27-421b-b211-659c970c0d35>
- Pohlen M. & Trujillo I, 2006:** „*The structure of galactic disks*”, *A&A* 454, 759-772
- Sandage, A. 1961:** „*The Hubble Atlas*”, Washington, D.C.: Carnegie Institution of Washington.
- Sandage, A. 1975:** „*Classification and Stellar Content Of Galaxies Obtained from Direct Photography in „Galaxies and the Universe” eds: Sandage, A., Sandage, M. & Kristian, J., Hale Observatories, Carnegie Institution of Washington, California Institute of Technology*
- Sandage, A., & Bedke, J. 1994:** „*The Carnegie Atlas of Galaxies. Volume I*”, Carnegie Institution of Washington
- Szegedi Tudományegyetem:** „*Galaktikus csillagászat*”,
http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat/8_Galaktikus_csillagaszat/GAL0.html
- van den Bergh, S. 1960:** „*A Preliminary Luminosity Classification of Late-Type Galaxies.*”, ApJ, 131, 215
- van den Bergh, S. 1960:** „*A Preliminary Luminosity Classification of Late-Type Galaxies.*”, ApJ, 131, 558
- van den Bergh, S. 1975:** „*The classification of normal galaxies*“, [JRASC..69...57V](#)
- van den Bergh, S. 1976:** „*A new classification system for galaxies*”, [ApJ...206..883V](#)

Wolf, M. 1908, Pub. Ap. Inst. Konig. Heidelberg, Vol. 3, No. 5.

Yoshizawa, M.; Wakamatsu, K. 1975:, „*On the Relative Importance of the Bulge to the Disk of Spiral and SO Galaxies*”, A&A...44..363Y

4. fejezet - Elliptikus galaxisok

Az elliptikus galaxisokat luminozitásuk alapján három fő alcsoportba osztjuk az óriás, közepes és a törpe elliptikus galaxisok. Ezek a luminozitási osztályok rendre:

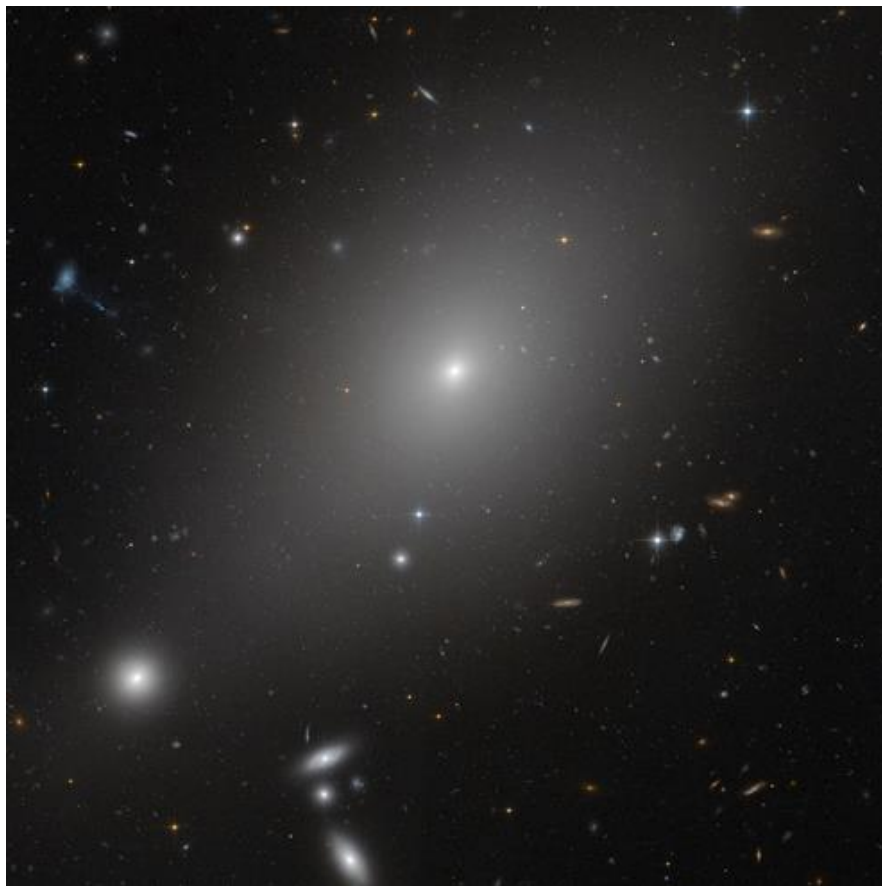
$L \geq 2 \times 10^{10} L_{\odot}$ avagy $M_B < -20$;

$2 \times 10^{10} L_{\odot} > L > 3 \times 10^9 L_{\odot}$ avagy $-20 < M_B < -18$;

$L < 3 \times 10^9 L_{\odot}$ avagy $M_B > -18$

A Tejútrendszerre $L \approx 2 \times 10^{10} L_{\odot}$.

Lapultságuk alapján az óriás és közepes elliptikusakat, a Hubble séma szerint az E0-E7 morfológiai osztályokba soroljuk, a törpék a dE galaxisok.



4.1. ábra: Az ESO 306-17 szuperóriás elliptikus galaxis (NASA/ESA/Michael West (ESO)
<http://www.spacetelescope.org/images/heic1004a/>.

4.1 Óriás és közepes elliptikus galaxisok

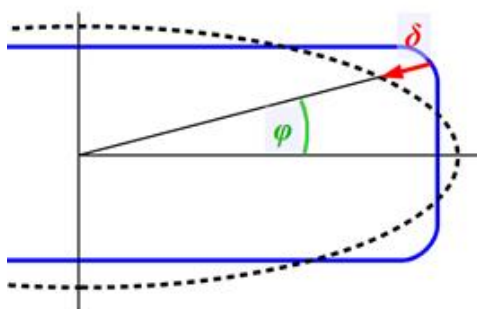
Az elliptikus galaxisokat az 1970-es évekig egyszerű, lapult, öreg csillagokból álló rendszereknek hitték, melyekben csillagközi anyag nincs, és korong sincs. Ezzel szemben a nagy tömegű elliptikus galaxisok nem lapult forgási ellipszoidok, hanem anizotrópikus sűrűség eloszlásúak. Van bennük csillagközi anyag, csak magas hőmérsékletű ($T > 10^6 \text{K}$). Gyakran fordul elő kinematikai pekularitás, mint például ellenkező irányban forgó mag. Gyakran van halvány, csillagos korongjuk. A kis tömegű elliptikusokban nem csak öreg csillagok vannak. Az elliptikus galaxisokban és bulge-ok középpontjában nagytömegű, vagy szuper nagytömegű fekete lyukat találunk, melyek ezek tömegének pár ezrelékét adják.

4.1.1. Az elliptikus galaxisok morfológiája

4.1.1.1. Szögletesség

Ahogy korábban láttuk a látszó lapultság szerinti osztályozás E_n osztályokba a (3.1) képlet szerint történik. A felületi fényesség izofótái általában nem szabályos ellipszisek. Az intenzitás eloszlás szerint két morfológiai osztályt különböztetünk meg, az úgynevezett korongos (disky) és négyszögletes (boxy). A kvantitatív megkülönböztetés a következőképpen történik. Minden izofóthoz egy-egy $R(\varphi)$ ellipszist illesztünk, a polárkoordinátás egyenlet:

$$R(\varphi) = \frac{ab}{\sqrt{(b \cos \varphi)^2 + (a \sin \varphi)^2}} \quad (4.1)$$



4.2. ábra: Az $R_i(\varphi)$ izofóta (kék) és a hozzá $R_e(\varphi)$ illesztett ellipszis (fekete szaggatott) közti $\delta(\varphi)$ radiális eltérés meghatározása.

Felírjuk az izofóta és a hozzá illesztett ellipszis közti $\delta(\varphi)$ radiális eltérést a φ polárszög függvényében:

$$\delta(\varphi) = R_i(\varphi) - R_e(\varphi) \quad (4.2)$$

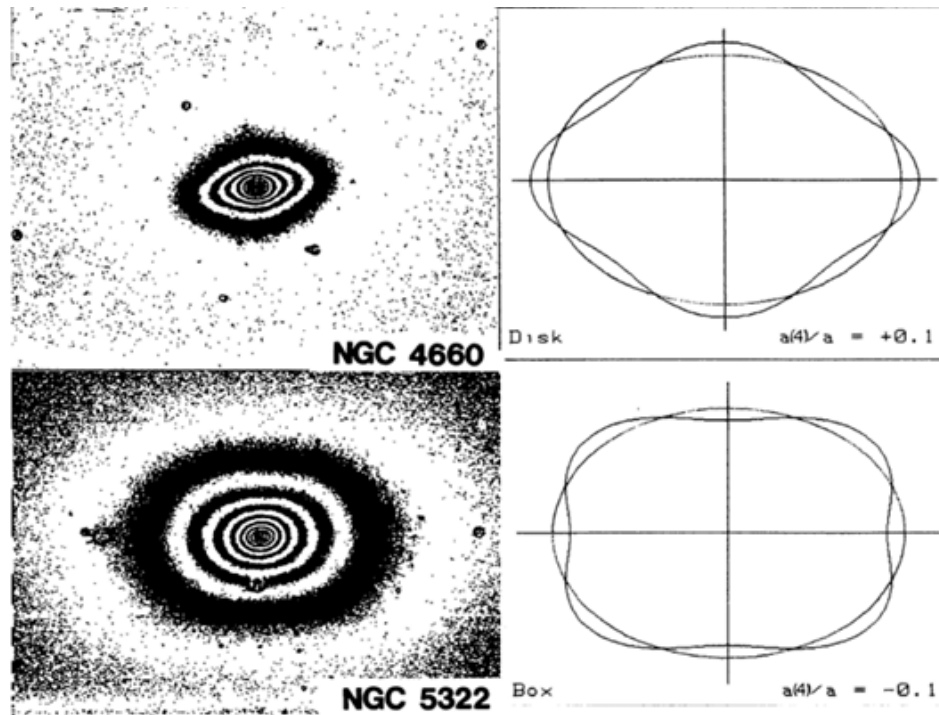
A $\delta(\varphi)$ radiális eltérést Fourier sorba fejtvé:

$$\delta(\varphi) = \bar{\delta} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\varphi) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\varphi) \quad (4.3)$$

$$\text{ha } a_4 < 0 \text{ akkor négyszögletes izofóta} \quad (4.4a)$$

$$\text{ha } a_4 > 0 \text{ akkor korongos izofóta} \quad (4.4b)$$

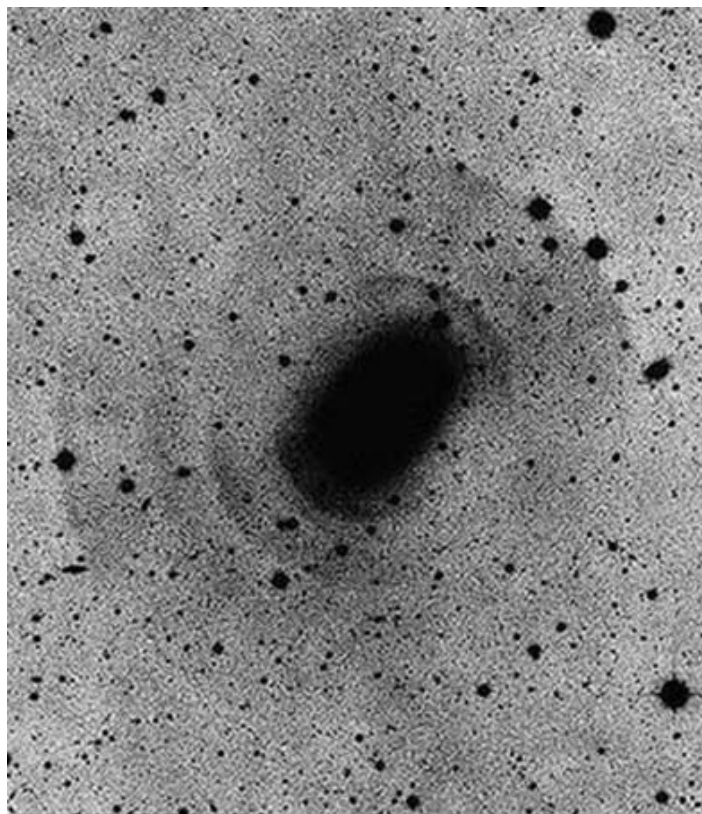
Ha jól sikerült az illesztéshez a tengelyeket megadnunk, akkor az a_n együtthatók $n < 0$ indexekre, valamint a b_n együtthatók minden n indexre kicsik lesznek, és (4.4) szerint osztályozhatunk. A négyszögletes izofóták egy elliptikus dudor és egy halvány csillagos korong szuperpozícióiként magyarázhatók. A korongos izofótájú Es galaxisok átmenetet képeznek a négyszögletes izofótájú Es-ek és az S0s osztályúak között.



4.3. ábra: Bal: korongos (disky, fent) és négyszögletes (boxy, lent) elliptikus galaxisok felületi fényesség eloszlása. Jobb: az $a(4)/a = 0,1$ és $a(4)/a = -0,1$ izofóták és az ehhez illesztett ellipszisek (Bender et al. 1988).

4.1.1.2. Héjak

Az elliptikus galaxisok képein időnként koncentrikus gyűrűket látunk, a fényesség eloszlási profiljukban „lépcsők” látszanak. Ezeket héjaknak (shells) hívjuk, és S0, Sa galaxisokban is megjelenhetnek. A jelenség magyarázata lehet egy kisebb galaxis bekebelezése nyomán megváltozott belső struktúra. A struktúra erőteljesebb megjelenítését például a kontrasztot az ún. *unsharp masking* képfeldolgozási technikával növelve lehet elérni.



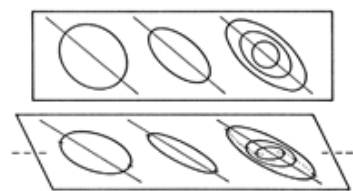
4.4. ábra: Héjak az NGC 3923 elliptikus galaxisban (Anglo-Australian Telescope <http://www.aao.gov.au/images/general/ngc3923.html>)

4.1.1.3. Izofóta elfordulás

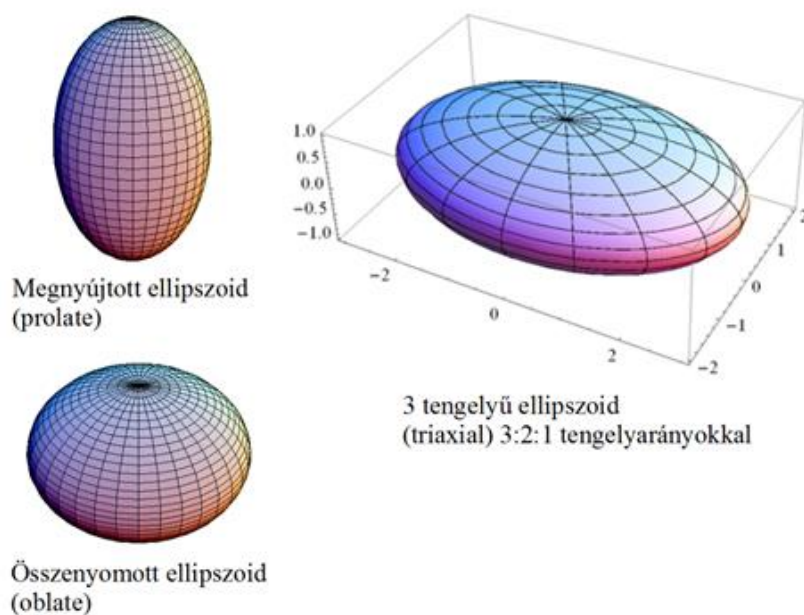
Az elliptikus galaxis egyszerűsített szerkezete (lásd 4.6. ábra) lehet megnyújtott (prolate), összenyomott (oblate), vagy három tengelyű/triaxiális (triaxial). Egy három tengelyű elliptikus galaxisban is lehet a központi rész forgásszimmetrikus. A forgásszimmetriától való eltérést méri a lapultság. Az azonos csillagsűrűséget jelentő ellipszoid felületek lapultsága változhat a középponttól kifelé. Ha tengelyeik pozíciósögei is változnak, az egyfajta belső eltekeredést jelent. A megfigyelt vetületi képen az izofótákhoz illeszthető ellipszisek ε lapultsága:

$$\varepsilon = 1 - b/a \quad (4.5)$$

Ahogy a 4.5. ábrán látjuk, ha a három tengelyű ellipszoidon belül a lapultság változik, akkor a vetületi képen mind az illesztett ellipszisek megfigyelt PA pozíciósöge, mind azok ε lapultsága változik. Pusztán az intenzitás eloszlást vizsgálva tehát nem állapítható meg, hogy az izofóta elfordulás valódi eltekeredést jelent-e.



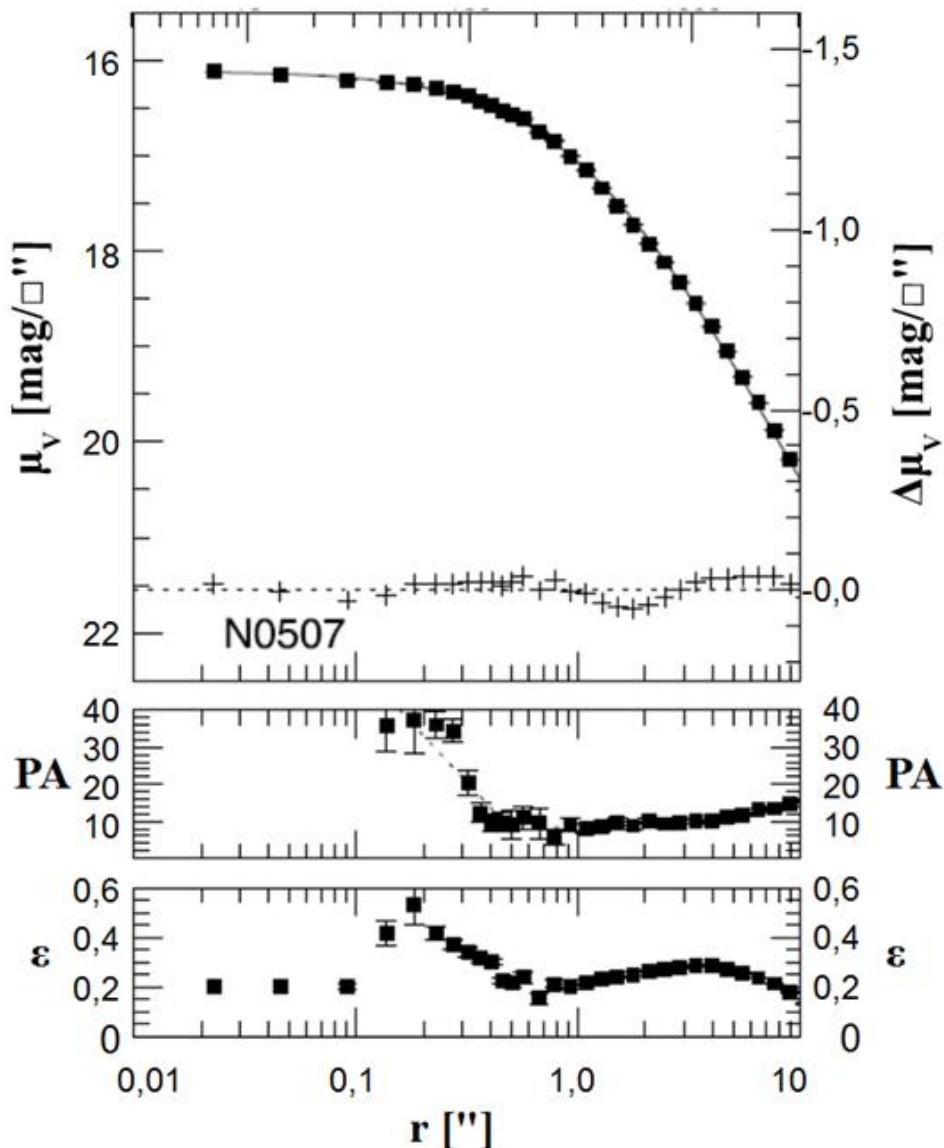
4.5. ábra: Az izofóta elfordulás oka lehet az azonos csillagsűrűséget jelentő ellipszoid felületek lapultságának (a forgásszimmetriától való eltérés mértékének) változása a középponttól kifelé. A felső metszeti képeken látjuk a lapultság változását, az alsó vetületi ábrán megfigyelhetjük, hogy a vetületi ellipszisek nagytengelyei szöget zárnak be egymással



4.6. ábra: Az elliptikus galaxisok lehetséges 3 dimenziós modelljei.
http://www.astro.virginia.edu/class/whittle/astr553/Topic07/t7_spheroid.html

4.1.1.4. Mag

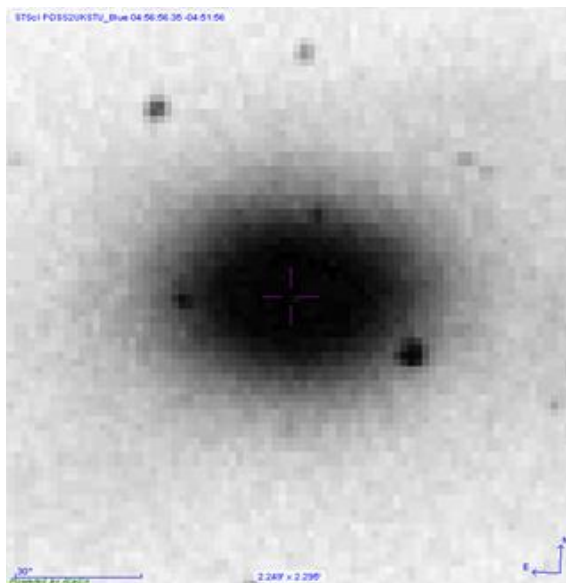
Az intenzitás profil közepes luminozitású elliptikus galaxisokra általában *csúcsos* (*cuspy*), míg az óriás elliptikusaknál lapult (lásd 4.6. ábra). Utóbbi galaxismag jelenlétére utal.



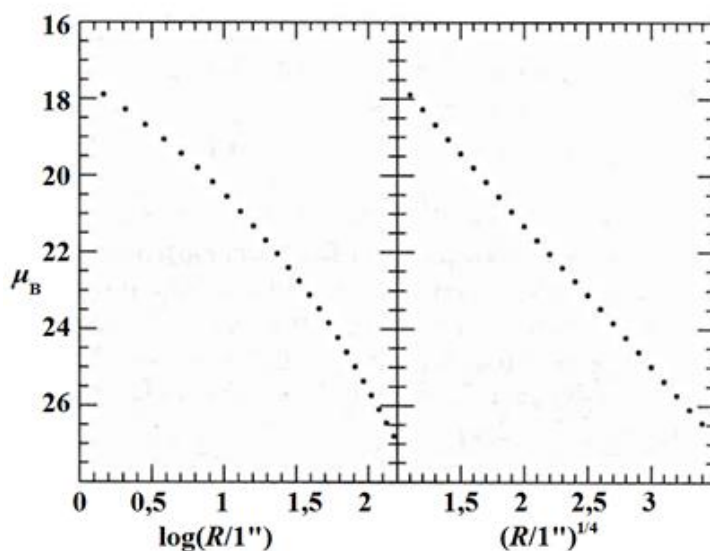
4.7. ábra: Az NGC 507 óriás elliptikus galaxis felületi fényesség profilja, az izofótákhoz illesztett ellipszisek pozíciósöge és lapultsága az illesztett ellipszisek fél nagytengelye függvényében. A központi régióban a felületi fényesség profil lapult az illesztett ellipszisek elfordulása és lapultság változása is látszik. (Lauer et al. 2005 <http://iopscience.iop.org/1538-3881/129/5/2138/pdf/204505.web.pdf>)

4.1.2. Az elliptikus galaxisok sűrűségmodellje

Az elliptikus galaxisok csillagának eloszlását a felületi fényesség radiális eloszlásának modellezésén keresztül határozzuk meg.



4.8. ábra: Az NGC 1700 óriás elliptikus galaxis B sávú fotografikus képe (STSC POSS2 UKSTU blue), az Aladin felhasználásával <http://aladin.u-strasbg.fr/java/nph-aladin.pl>



4.9. ábra: Az NGC 1700 óriás elliptikus galaxis μ_B B sávú felületi fényesség profilja. A bal oldali grafikonon az $r = (R/1'')$ ívmásodpercben mért galaktocentrális távolság logaritmusának, a jobboldali ábrán $(R/1'')$ negyedik gyöke függvényében. Látszik a de Vaucouleurs által megállapított $\mu(r) \sim r^{1/4}$ összefüggés.

A felületi fényesség eloszlásra elliptikus és lentikuláris galaxisoknál de Vaucouleurs a bulge-okhoz hasonlóan $\mu(r) \sim r^{1/4}$ -t kapott. Lásd a 4.9. ábrán bemutatott példát az NGC1700-ra, ahol az intenzitás eloszlása az R_c karakterisztikus sugárnál (ezen belülre esik a galaxis sugárzásának fele) mért I_c intenzitással:

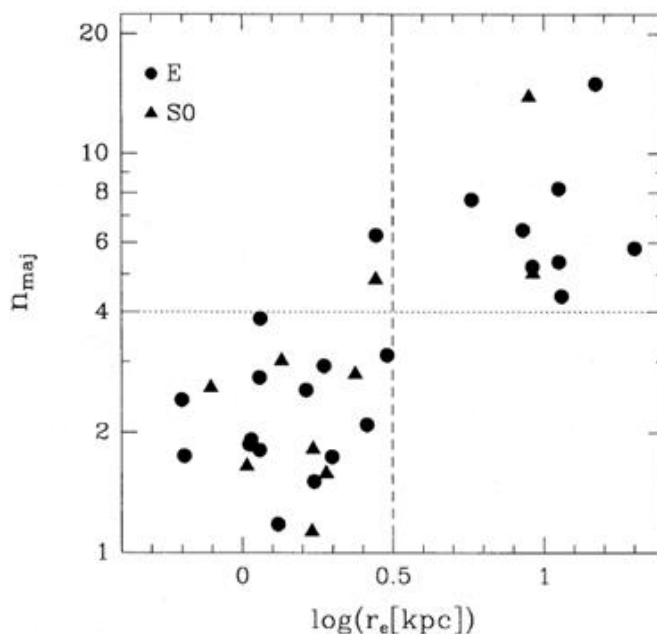
$$I(r) = I_c \times 10^{\left[-3,33 \left(\left(\frac{r}{R_c} \right)^{1/4} - 1 \right) \right]} \quad (4.6)$$

Az NGC 1700 középponti intenzitása $I_0 \approx 2000 I_c$.

A de Vaucouleurs profil általánosított alakja, az úgynevezett *Sersic profil* (Sersic 1963), az eredeti kifejezést kicsit módosítva írjuk fel (Caon et al. 1993):

$$I(r) = I_C \exp\left(-k \left(\frac{r}{r_C}\right)^{1/n} - 1\right) \quad (4.7)$$

Ahol r_C a karakterisztikus sugár; I_C az ennek megfelelő felületi fényesség; n a Sersic-index; k pedig egy arányossági tényező, amit általában úgy választunk, hogy az r_C -nél húzott izofótán belül a teljes fényesség fele legyen: ekkor $k = 7,6692$. Az r_C és I_C más elnevezései rendre effektív sugár és effektív intenzitás. A közelítően ellipszis alakú galaxis képen a felületi fényesség profilt vizsgálhatjuk a kis és nagytenyely irányában, általában a nagytenyely irányában tesszük, ekkor a Sersic-indexet írhatjuk így is: n_{maj} . A Sersic-index és az effektív sugár között korreláció figyelhető meg.



4.10. ábra: Az n_{maj} Sersic-index az r_e effektív sugár függvényében. A körök elliptikus, a háromszögek lenticuláris galaxisok a Virgo halmazban. A szaggatott vonal elválasztja a halvány és fényes galaxisokat, a pontozott vonal az $n_{maj}=4$ de Vaucouleurs profilnak megfelelő (Caon 1993).

Szokás még használni az úgynevezett *Hubble-profil*, melyben az I_0 középponti felületi fényesség és az r_0 mag rádiusz szerepel, ahol r_0 a galaxis középponti zónájának sugara ahol a felületi fényesség konstans. Az óriás elliptikus galaxisoknál $r_0 > 0$. A Hubble-profil:

$$I(r) = \frac{I_0}{(1+r/r_0)^2} \quad (4.8)$$

A fényes maggal nem rendelkező elliptikus galaxisok központi felületi fényesség eloszlása jól közelíthető az elméleti úton levezethető King modellel (King 1962, 1966), melyet ma leginkább csillaghalmazokra alkalmaznak.

4.1.3. Az elliptikus galaxisok kinematikája

A 20. század első felében az általános vélekedés az E morfológiai osztályban a lapultságot a gyors forgás következményének fogadta el. A közepes elliptikus galaxisok, ezek a szögletes profilúak (disky) valóban gyorsan rotálók. Az óriás elliptikusok viszont nem.

A σ sebesség szórás a Faber-Jackson relációt követi:

$$L_V = 2 \times 10^{10} L_{\text{Nap}} \left(\frac{\sigma}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^4 \quad (4.9)$$

ami a galaxis távolságának meghatározását is lehetővé teszi.

4.1.4. Az elliptikus galaxisok csillagtartalma

A 10Mpc-nél távolabbi galaxisokban individuális csillagok megfigyelése (eruptív változókat leszámítva nem lehetséges) ezért az integrális fotometriai és spektroszkópiai paramétereiből lehet a csillagtartalomra következtetni. Tipikusan az elliptikus galaxisok spektruma a K óriásokéra emlékeztet. Az E morfológiai osztályú galaxisok általában vörösek, és minél nagyobb luminozitásúak annál inkább azok. Nincs csillagkeletkezésre utaló spektrális jellemző, csillagaik idősebbek, mint 1 milliárd év, ami azt is jelenti, hogy a fősorozat felső (nagy luminozitású) részéről már elfejlődtek a csillagok. Tipikusan 2 naptömegnél kisebb csillagok lehetnek még a fősorozaton, és a fényesség zömét az óriáság csillagai adják. Az elliptikus galaxisok központi régiójában a fémesség a Napéhoz hasonló (fémgazdag).

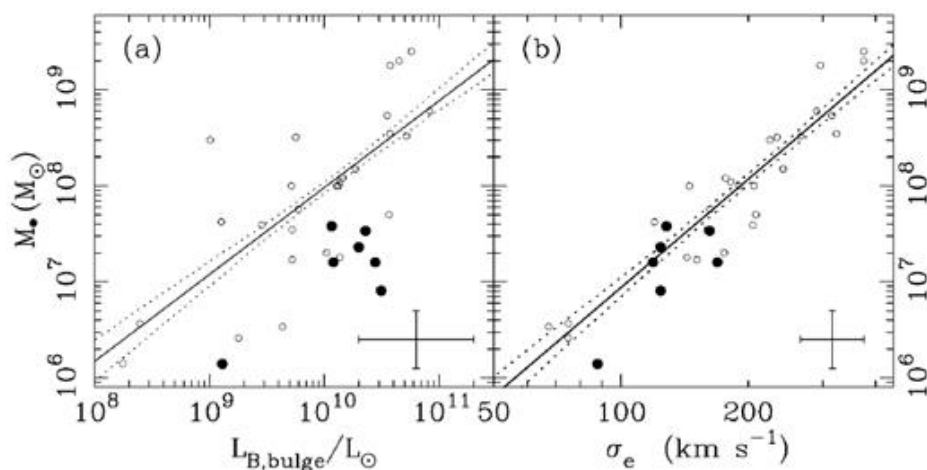
4.1.5. Csillagközi anyag elliptikus galaxisokban

Hideg csillagközi anyag tartalmuk kicsi, a legnagyobbakban nagyságrendben néhányszor 10^8 naptömegnyi semleges (atomos és/vagy molekuláris) hidrogén gáz lehet, ami 2 nagyságrenddel kevesebb, mint a hasonló tömegű spirálgalaxisokban. Ugyanakkor a csillagtömeg 10-20%-át elérheti a több millió K hőmérsékletű, röntgen sugárzó forró és ionizált gáz tömege. A röntgen sugárzó gáz eloszlása nem egyenletes, de lényegében halo-t képez.

4.1.6. Fekete lyuk elliptikus galaxisok középpontjában

A középpont felé növekedést mutató sebességprofilokból nagy tömeg koncentrációra lehet következtetni számos elliptikus galaxisnál. Még a törpe elliptikus M32-es galaxis középpontjában is egy 2 millió naptömeg tömegű objektum található. Óriás elliptikusoknál kimutatták a fekete lyuk és környezete összes jellemző jelenségét.

A központi fekete lyuk tömege kapcsolatba hozható a sebesség szórással, így tehát a teljes luminozitással is. Nem meglepő módon a nagyobb tömegű és luminozitású E galaxisokban vannak a nagyobb úgynevezett szuper nagy tömegű fekete lyukak (lásd például Gebhardt et al. 2000).



4.11. ábra: A központi fekete lyuk tömege (a) a bulge luminozitása, illetve (b) a sebesség szórás függvényében. A tömeget a minta két részére különböző módszerrel állapították meg, ezt jelölik az üres és tele körök. A legjobban illeszkedő korrelációs egyeneseket folytonos vonallal rajzolták, ezek 68%-os konfidencia intervallumát pedig szaggatott vonallal. A hibát a jobb alsó sarkokban kereszt jelzi (további információ és image credit: Gebhardt et al. 2000, és Gebhardt et al. 2000b).

4.1.7. Az elliptikus galaxisok eloszlása

Az óriás elliptikus galaxisok rendszerint galaxishalmazok központi vidékein találhatóak, és gyakran ezen halmazok legnagyobb tömegű tagjai.

4.2 Törpe elliptikus galaxisok

Néhány kiegészítő megjegyzést teszünk a törpe elliptikus galaxisokra. A törpe elliptikus galaxisok (dE osztály) egyfajta átmenetnek is felfoghatók az elliptikus galaxisok vagy bulge-ok és a gömbhalmazok között, és az utóbbiakhoz állnak közelebb. Abszolút fényességük $-18 < M < -14$ jóval kisebb az óriás elliptikusokénál. Felületi fényesség eloszlásuk exponenciális.

A törpe elliptikus galaxisokat, részben nyilván kiválasztási hiba miatt is, nagyobb galaxisok körül fedezik fel. A szatelita törpe elliptikusok és a fő galaxis között gyakran mutatnak ki kölcsönhatást anyagátadással, és a szatelliták beleolvadnak a nagyobb galaxisba.



4.12. ábra: A Fornax törpe elliptikus galaxis a Tejútrendszer szatellitája. (ESO/Digitized Sky Survey 2 <http://www.eso.org/public/images/eso1007a/>)

A törpe szferoidális galaxisok a törpe elliptikusoknál is halványabbak. Látszólag hasonlítanak a gömbhalmazokra, de csillag eloszlásuk különbözik azokétól. Jelentős arányban lehet bennük sötét anyag.



4.13. ábra: A Sculptor törpe szferoidális galaxis, dSph (David Malin, Anglo-Australian Observatory <http://www.jb.man.ac.uk/news/2009/primitivedust/>)

Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:

Bender, R. et al. 1988: „*Isophote shapes of elliptical galaxies. I - The data*”, [A&AS...74..385B](#)

Caon, N. et al. 1993: „*On the Shape of the Light Profiles of Early Type Galaxies*”, [MNRAS.265.1013C](#)

Carter W.D. 1983: „*A Catalog of Elliptical Galaxies with Shells*”, *Ap J.* 274 534-540

Gebhardt, K. et al. 2000: „*Black Hole Mass Estimates from Reverberation Mapping and from Spatially Resolved Kinematics*”, [ApJ...543L...5G](#)

Gebhardt, K. et al. 2000b: „*Axisymmetric, Three-Integral Models of Galaxies: A Massive Black Hole in NGC 3379*”, *2000AJ....119.1157G*

Helmi, A. 2006: „*Galaxies course*”, http://www.astro.rug.nl/~ahelmi/galaxies_course/

Lauer T.R. 2005: „*The Centers of Early-Type Galaxies with Hubble Space Telescope. V. New WFPC2 Photometry*”, [AJ....129.2138L](#)

Sérsic, J. L. 1963: „*Influence of the atmospheric and instrumental dispersion on the brightness distribution in a galaxy*”, [BAAA....6...41S](#)

5. fejezet - Spirálgalaxisok

A spirálgalaxisok tulajdonságai.

5.1. A galaxisok fő összetevői

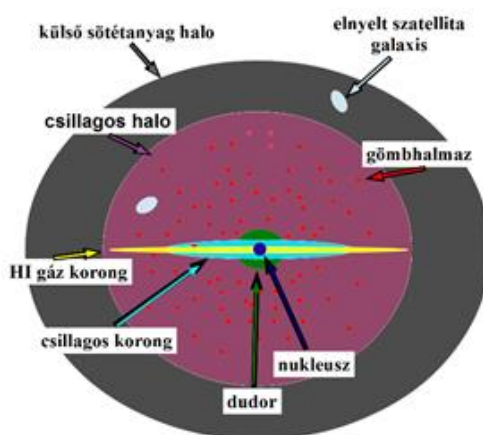
A galaxisokban a következő alrendszerek találhatók: szferoid, korong, halo.

A szferoidot általában öreg csillagok alkotják, melyek fémsége tág határok között változhat a fémszegénytől a fémgazdagig. Az intenzitás eloszlást de Vaucouleurs profil írja le.

A korongban fiatal és idősebb csillagokat is találunk, az Sa-nál későbbi típusoknál csillagkeletkezéssel. Atomos és molekuláris hideg csillagközi gáz, por, csillagkeletkezés és szupernóvák által fűtött forró gáz is megfigyelhető benne. Az intenzitás eloszlása exponenciális.

A halo alatt egyfelől egy gömbhalmazok és fémszegény csillagokból álló gömbszimmetrikus rendszert, a *barionikus halot*, másfelől egy alapvetően sötét anyagból álló, a barionikus tömegnél 5-10-szer nagyobb össztömegű enyhén lapult rendszert, a *sötét anyag halot* értjük.

A spirálgalaxisokban mindezen összetevők megtalálhatóak (lásd 5.1. ábra). A központi szferoidális rendszert nukleusznak, bulge-nak, vagy dudornak nevezzük.



5.1. ábra: A spirálgalaxisok alrendszerének sematikus rajza.

5.2. Spirálkar indikátorok

5.2.1. A spirálkarok megjelenési formái

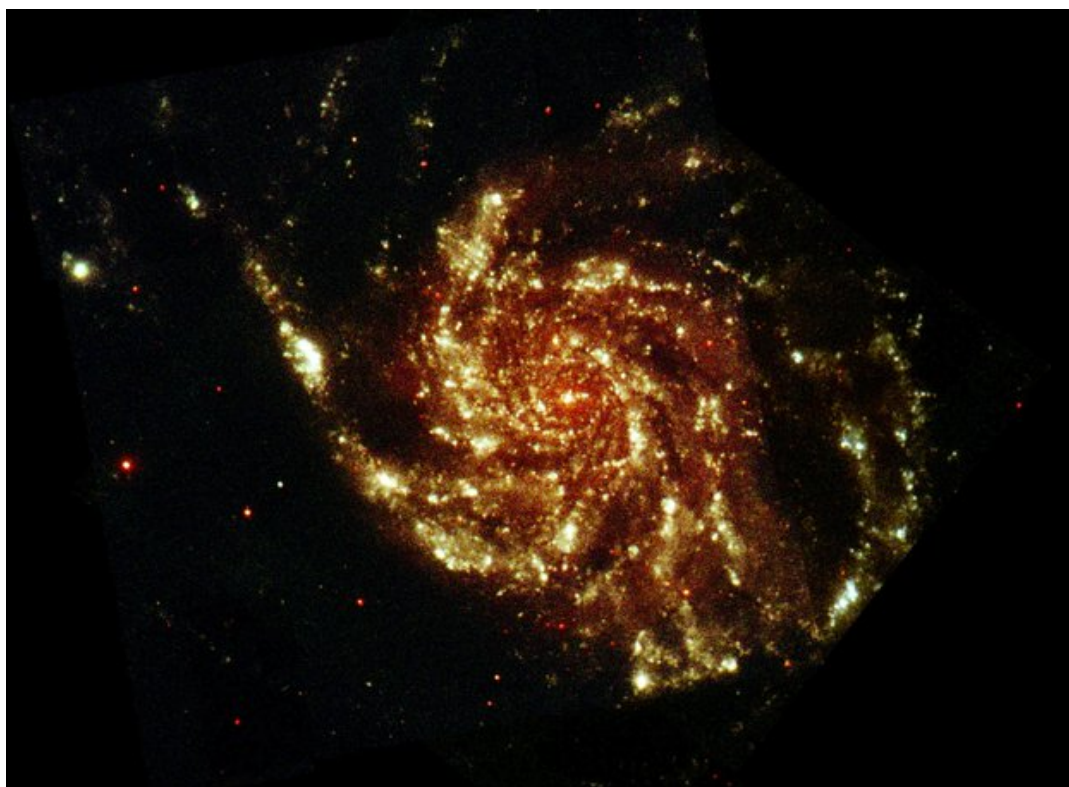
A spirálkarok a korongban láthatók. Az Sa-tól az Sb-n keresztül az Sc osztályig a nukleusz részesedése a luminozitásban csökken, és a karok eltérülési szöge növekszik. Az Sa-k nagy dudorral és szorosan feltekeredett karokkal, az Sc-k kis nukleusszal és laza karokkal rendelkeznek. A korongban lehet csak spirál, vagy inkább gyűrű struktúra, vagy a kettő együtt. Lehet küllő mentes, vagy erőteljes küllővel rendelkező galaxis. A változatos formák mellett a spirálkar alkotók ugyanazok:

- fiatal, nagytömegű csillagok, és ilyenek csoportjai, azaz OB asszociációk;
- ionizált hidrogén felhők, azaz HII zónák;

- 10^5 naptömeg tömegű, molekuláris hidrogént tartalmazó felhők, azaz óriás molekulafelhők (giant molecular cloud, GMC)
- HI szuperfelhők bennük óriás molekulafelhők és OB asszociációk, azaz csillag-gáz komplexek

5.2.2. OB asszociációk és HII zónák

A fiatal, nagytömegű csillagok 10-50pc sugarú környezetüket ionizálják, a csillagok és a meleg, ionizált gáz ultraibolya sugárzása (UV kontinuum), valamint a hidrogén gáz rekombinációja nyomán a hidrogén Lyman α vonalas sugárzása kirajzolja a spirálkarokat. A forró csillagok sugárzása közvetlenül, illetve szóródva a csillagközi felhők porszemcséin ultraibolya és kék tartományban is megfigyelhető. A spirálgalaxisok korongjának ultraibolya és kék képe ezért hasonló – a spirál szerkezetet mutatja.



5.2. ábra: Az M101 spirálgalaxis ultraibolya kompozit képe az XMM-Newton Optical Monitor távcsövével.
Színkódolás: vörös (200–400 nm), zöld (200–300 nm), kék (175–275 nm)
(<http://spaceimages.esa.int/Images/2013/06/M101> ESA/XMM & R. Willatt).

A látható tartományban jelentős a hidrogén Balmer α vonalas emissziója szintén a rekombináció kísérő jelenségéeként. Ez okozza, hogy vörös sávú felvételeken megint a spirálkarok uralják a korong morfológiáját. A közeli infravörös tartományban a HII zónák forró porszemcséinek folytonos sugárzása, valamint az ultraibolya sugárzással gerjesztett legkisebb porszemcsék vonalas emissziója uralkodó, mely ismét a spirálkarokat rajzolja ki. A távoli infravörös hullámhosszakon az OB asszociációk közelében felmelegített nagy porszemcsék folytonos sugárzása megint jelentős lesz a spirálkarokban.

Az OB asszociációkat és HII zónákat tehát láthatjuk az ultraibolyától a távoli infravörösig.

5.2.3. Óriás molekulafelhők és HI szuperfelhők

A spirálgalaxisok korongjában mindenhol jelen van a csillagközi gáz és annak leggyakoribb eleme a hidrogén. Már az első HI 21cm-es felmérések lokális maximumokat jeleztek a semleges hidrogén gáz sűrűségében az OB asszociációk eloszlása alapján megrajzolt Galaktikus spirálkarok mentén. Az extragalaxisokban szintén azt

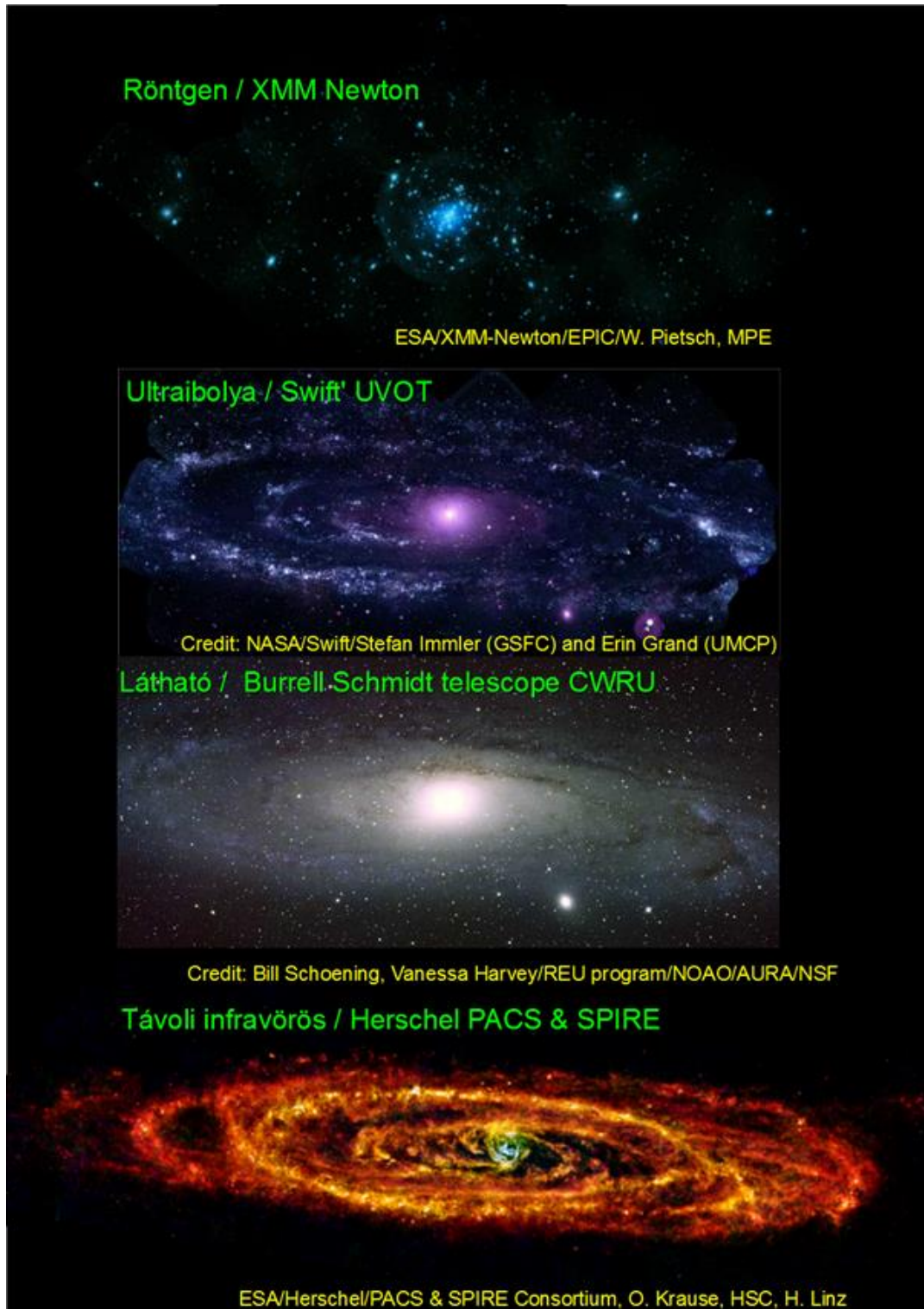
tapasztaljuk, hogy a legnagyobb HI felhők kirajzolják a spirálkarokat. Gyakran ezek a látható korongon kívül a „csillagos” karok meghosszabbításaként tűnnyúlnak azokon.

Bizonyos nagy extinkciójú galaktikus felhőkben a HI 21cm-es sugárzás intenzitása már nem arányos a csillagközi anyag oszlopsűrűségével. Ennek legfőbb oka, hogy a hidrogén gáz részben, vagy túlnyomó részben molekuláris. (Ugyanezen sűrű csillagközi felhők legsűrűbb részein a különben optikailag vékony HI 21cm-es vonal lehet optikailag vastag.) A CO gáz vonalas emissziója viszont jó nyomjelzője a molekuláris hidrogénnek a galaxisokban.

A spirálkarok csak pár százalékos lokális sűrűség növekedést jelentenek, mégis meghatározó a járuléka a spirálgalaxis luminozitásához.

5.3. Spirálgalaxisok alrendszerei

A legközelebbi spirálgalaxisokban az alrendszereket jó felbontással felmérhetjük, az alrendszerek szerkezetét is tanulmányozhatjuk. A távolabbiakban elsősorban a multispektrális fényesség-eloszlás görbékből következtetünk rá.



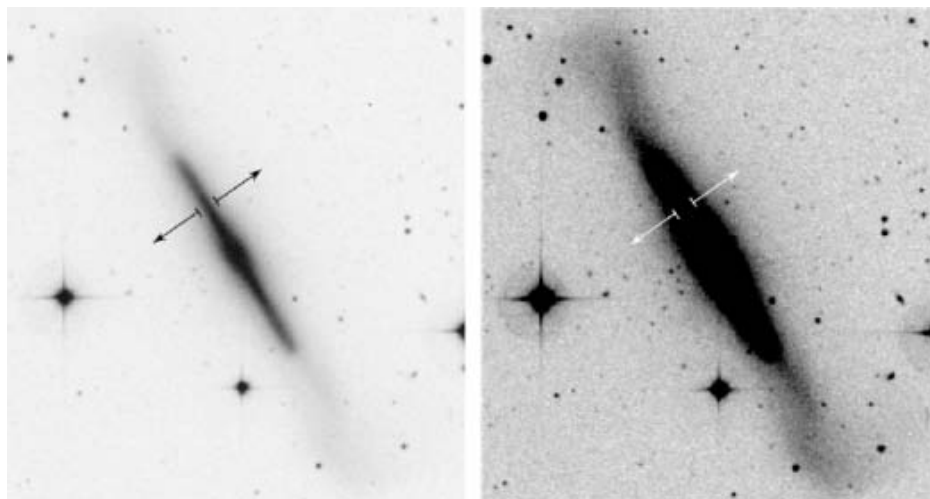
5.3. ábra: Az M31 galaxis röntgen, ultraibolya, látható és infravörös képe.

5.3.1. Korong

Az intenzitás eloszlás bizonyos spirálgalaxisokra egyszerű exponenciális, ekkor az I intenzitást a korong szimmetriasíkjától vett z távolsággal felírva:

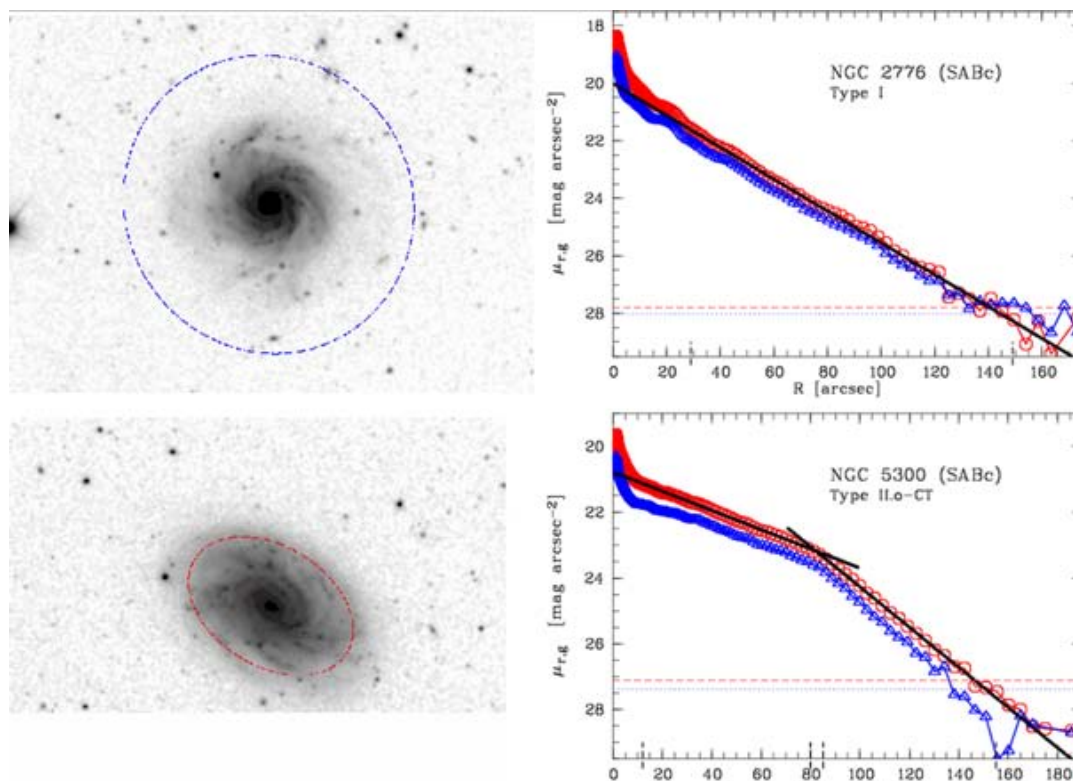
$$I(z) = I(0) \exp\left(-\frac{|z|}{z_0}\right) \quad (5.1)$$

Gyakrabban azonban 2 exponenciális lineáris kombinációval közelíthető, ami azt jelenti, hogy két skálamagasság kell a leíráshoz, ekkor egy *vékony* és egy *vastag korong* (*thin disk*, *thick disk*) a modellünk. A skálamagasságok egy korai tanulmány szerint a Tejútrendszerben a korong komponensekre: a vékony korongé $z_0 \approx 300$ pc; a vastag korongé $z_0 \approx 1.45$ kpc (Gilmore & Reid 1983).



5.4. ábra: A vékony és vastag korongot az NGC4762 SB0 morfológiai osztályú lentikuláris galaxis képein mutatjuk be (Tsikoudi 1980).

A Tejútrendszer csillagtartalmának modellezése is ilyen kettős koronggal történt, de legújabbban egy, közepesen vékony koronggal is sikerült leírni (Rix et al 2012). Ha megkülönböztethető a vékony és vastag korong, ez a megkülönböztetés a csillagtartalommal is történik. A vékony korongban magasabb fémességű és fiatalabb csillagokat találunk, mint a vastag korongban. Az M31 csillagos korongja 15kpc galaktocentrikus távolságon kívül is folytatódik egy 5kpc skálahosszú exponenciális eloszlással egészen 40kpc-ig (Ibata et al. 2011). Ez az óriási, alacsony átlagos fém tartalmú csillagpopulációt mutató korong a strukturáltsága alapján befogott csillagokból áll. A korongok nem mindegyike mutat ilyen külső komponenst, némelyik felületi fényesség profilja egészen nagy rádiuszokig változatlan. A 5. ábrán egy ilyen, az NGC2776, és egy *csonka* (*truncated*) galaxis, az NGC5300 profilját is megmutatjuk (Pohlen & Trujillo 2006).



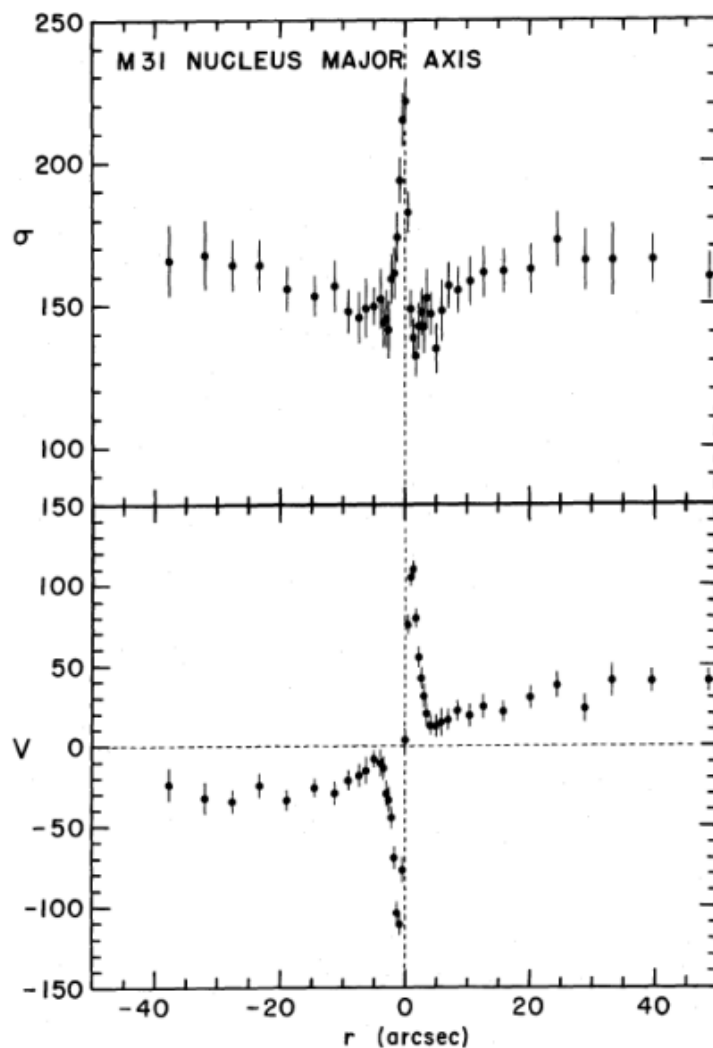
5.5. ábra: SDSS r' sávú képek (bal), illetve g és r' felületi fényesség profilok (jobb) (Pohlen & Trujillo 2006).

A spirálgalaxisokban a korongban (és a korong halo határán) található a hideg csillagközi gáz, és a por. A gravitációs kölcsönhatásban lévő galaxisok között is lehet gáz átadás, mint például a Magellán Áramlás az SMC-LMC párostól a Tejútrendszer felé. Ehhez hasonló az M31 déli részéhez kapcsolódó csillagárammal egybeeső HI felhők rendszere, ahol azonban a behulló gáz forrását jelentő szatelita galaxist nem ismerjük (lásd 5.7. ábra). A csillagközi anyagról később bővebben is szólnunk. A csillagkeletkezés a korongban történik. Tekintettel az aktív és folyamatos csillagkeletkezésre a korongban sok fiatal csillagot találunk. A csillagok átlagos fémtartalma magas (a Napéhoz hasonló). A korongban rendezett forgás (differenciális rotáció) figyelhető meg, a sebesség diszperzió nagyobb tangenciális sebességekkel. A morfológiai osztály névadója a spirál szerkezet – lásd a 3. fejezetet és az előző alfejezetet. A korong felületi fényesség profilja a spirálkarok miatt is eltérhet az exponenciálistól.

A spirál szerkezetének jellemzésére használt változó az eltérülési szög (pitch angle, lásd a 3. fejezetben).

5.3.2. Dudor – bulge

A spirálgalaxisok középső alrendszere általában egy sferoidális alrendszer alakja szerint is találó kifejezéssel „dudor”, vagy angol szóval „bulge”. A bulge intenzitás eloszlását Sersic-profillal írhatjuk le, lásd (8.5.) egyenlet. A bulge és a spirálgalaxis középpontjában találjuk a nukleuszt, melyben nagytömegű fekete lyuk és annak kísérei jelenségei figyelhetők meg. Kormendy (1988) az M31 középpontjában szuper nagytömegű ($10^8 M_{\text{Nap}}$) fekete lyuk létrehozását következtetett a sebesség profilokból ($V > 110 \text{ km s}^{-1}$, a középponttól 2,5 pc-re, lásd 5.6. ábra).



5.6. ábra: Sebesség diszperzió σ (felül), és nagy tömegű kompakt centrális forrásra utaló rotációs görbe (alul) az M31 nukleuszra (Kormendy 1988).

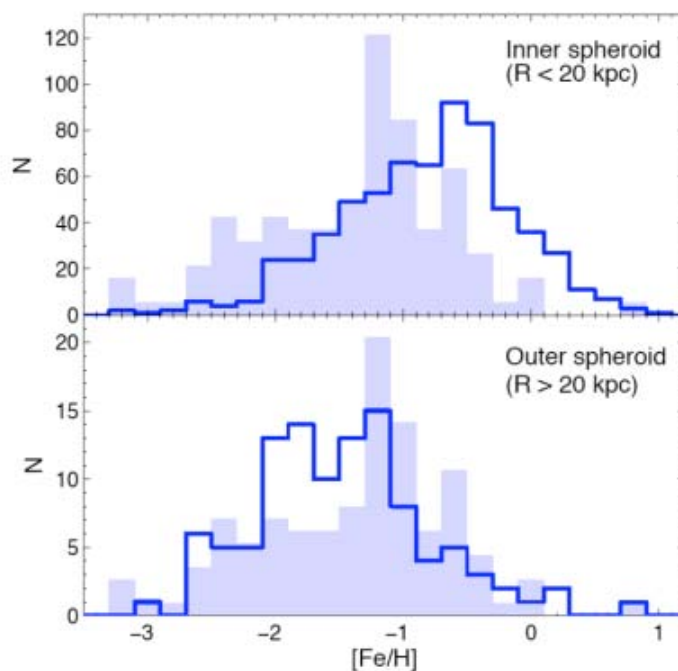
A dudor fényesség eloszlása gyakran de Vacouleur profillal leírható, mint az elliptikus galaxisoké, és szerkezete is hasonló, mint a Tejútrendszer dudoráé. Van a Tejútrendszerénél is jelentősebb bulge, mint például az M31-é. Vannak ugyanakkor „dudor nélküli”, vagy pszeudo-dudoros spirálgalaxisok is. A pszeudo-bulge igazából egy korong-szerű alrendszer, benne esetleg akár egy mini spirállal. Ilyen van az ESO 498-G5 spirálgalaxisban (lásd 5.7. ábra).



5.7. ábra: Az ESO 498-G5 SAB(s)bc pec morfológiai típusú galaxis kompozit képe a Hubble Space Telescope ACS B (435 nm) és I (814 nm) sávú felvételeiből. A galaxis középpontjában szférikus alrendszer helyett egy kis spirált látunk (ESA/Hubble & NASA 2012, <http://www.spacetelescope.org/static/archives/images/large/potw1221a.jpg>)

5.3.3. Barionos, vagy csillagos halo

A spirálgalaxisok hengersizmetrikus korongjától nem csak szerkezetében tér el a közel gömbszimmetrikus halo, hanem csillagtartalmában is. Alapvetően a korongnál fémszegényebb, késői típusú csillagok alkotják. Az M31 halo csillagainak fémtartalma nem annyira alacsony, mint a Tejútrendszer halo csillagaié (lásd 5.8. ábra). A halo csillagpályái elnyúlt ellipszisek a koronghoz képest változó hajlásszöggel a galaxis középpontja körül. A halo jellegzetes objektumai a gömbhalmazok, illetve befogott szatelita galaxisok.

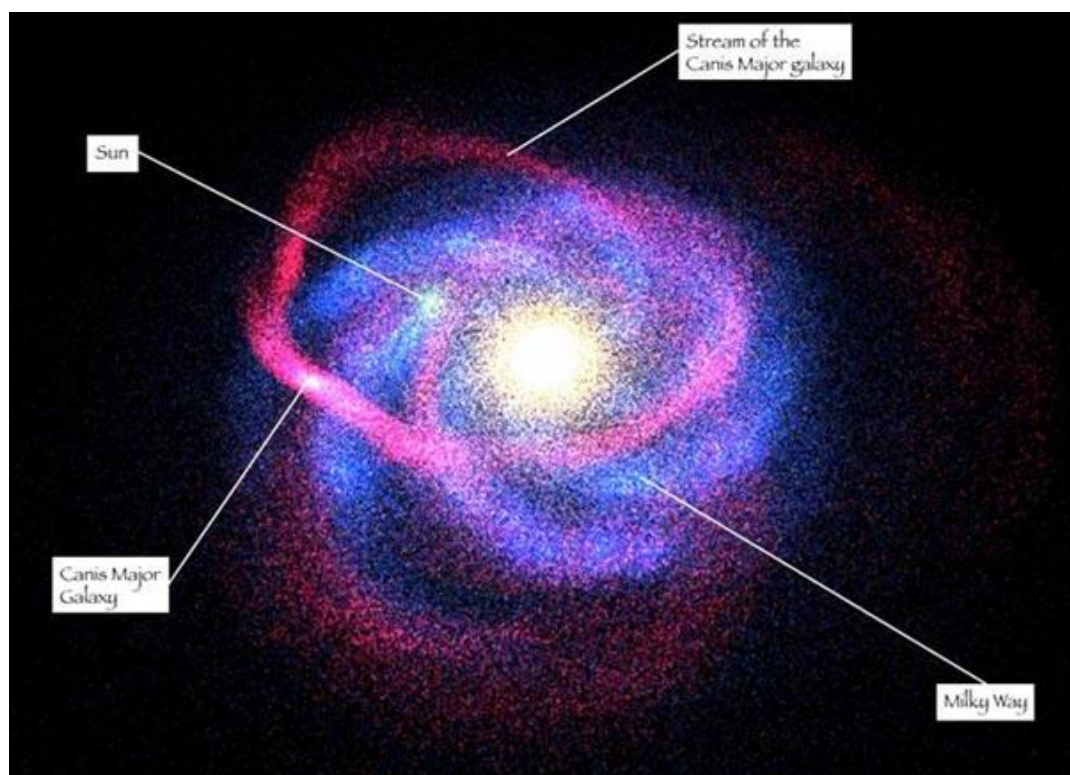


5.8. ábra: Az M31 kettős haloja. Kék vonal: a halo csillagainak fémtartalom (vas-hidrogén index) eloszlásgörbéi (metallicity distributions) a belső ($r < 20$ kpc, fent) és külső ($r > 20$ kpc, lent) zónára. Szürke hisztogram: az M31 csillagáramának fémség eloszlása (Koch et al. 2007).

A Tejútrendszer csillagtartalmának a 2MASS felmérés eredményeihez illeszkedő modellezése is kettős koronggal történt, ebben a vékony és vastag korong skálamagassága rendre 205 ± 40 pc és 640 ± 70 pc (Polido et al. 2013). Az alternatív elmélet szerint egyetlen, közepesen vékony korong van (Rix et al 2012).

5.3.4. Sötétanyag halo

A radiális sebességek (gáz, csillagok) eloszlásából következtethetünk a tömeg eloszlására. A csillagtömeg kétszeresét elérő sötét anyag lehet jelen a korongban. A külső halo befogott törpegalaxisainak elemzésével egy sötétanyag haló létezését mutathatjuk ki a közeli spirálgalaxisokra épp úgy, mint a Tejútrendszerre. Ennek kiterjedése 90kpc körül lehet, azaz a spirálgalaxisok, mint az M31 valójában legalább 180kpc átmérőjűek.



5.9. ábra: A Tejútrendszer (kék) és a Canis Major törpegalaxis csillagáramának sematikus ábrázolása. Utóbbi segítségével modellezhető a sötét anyag haló tömegeloszlása. (Credit: Nicolas Martin & Rodrigo Ibata, Observatoire de Strasbourg, 2003.)

5.4. Csillagközi anyag

A spirálgalaxisokban a csillagközi anyag mennyisége jelentős, a barionos tömeg 10-40%-át adhatja. Leggyakoribb összetevője, a hidrogén gáz állapota szerint alapvetően 3 fázisban van jelen:

- hideg és sűrű: néhány K $< T_{\text{kin}} < 100$ K, $10^7 \text{ cm}^{-3} < n(\text{H}) < 1 \text{ cm}^{-3}$
- meleg: néhány ezer K $< T_{\text{kin}} \leq 10000$ K, $0,1 \text{ cm}^{-3} < n(\text{H}) < 100 \text{ cm}^{-3}$
- forró: néhány százezer K $< T_{\text{kin}} \leq$ millió K, $0,001 \text{ cm}^{-3} < n(\text{H}) < 0,1 \text{ cm}^{-3}$

A hidrogén gáz a hideg és sűrű fázisban alapvetően neutrális, részben molekuláris; a meleg fázisban részben vagy nagy részben ionizált; a forró fázisban ionizált. Mindhárom fő fázisban egyéb elemek is jelen vannak az adott galaxis elemgyakoriságának megfelelően. Ez alól kivétel a frissen bekebelezett extragalaktikus eredetű csillagközi anyag, mely fémessége eltérő lehet. A gáz kémiai összetételéről és fizikai állapotáról a hideg fázisban alapvetően a HI 21cm-es és a CO 2,6mm-es vonalas sugárzása mérésével; a meleg és forró fázisban pedig a gáz emissziós vonalait és kontinuum sugárzását és háttér csillagok elnyelési vonalait mérve tájékozódunk. Az emissziós vonalak

közül kiemeljük a hidrogén rekombinációs vonalait, különös tekintettel az ultraibolya tartományban a Lyman α , és a látható tartományban a Balmer α vonalakat. Ezek a rekombinációs vonalak a jelentős ionizáló sugárzású forró, fiatal, nagytömegű csillagok közelében, tehát az aktív csillagkeletkezési területeken keletkeznek. Ezért gyakran ezekkel mérjük a galaxis csillagkeletkezési aktivitását is. A csillagkeletkezési ráta (star forming rate, SFR) Kennicutt et al. (1994) szerint:

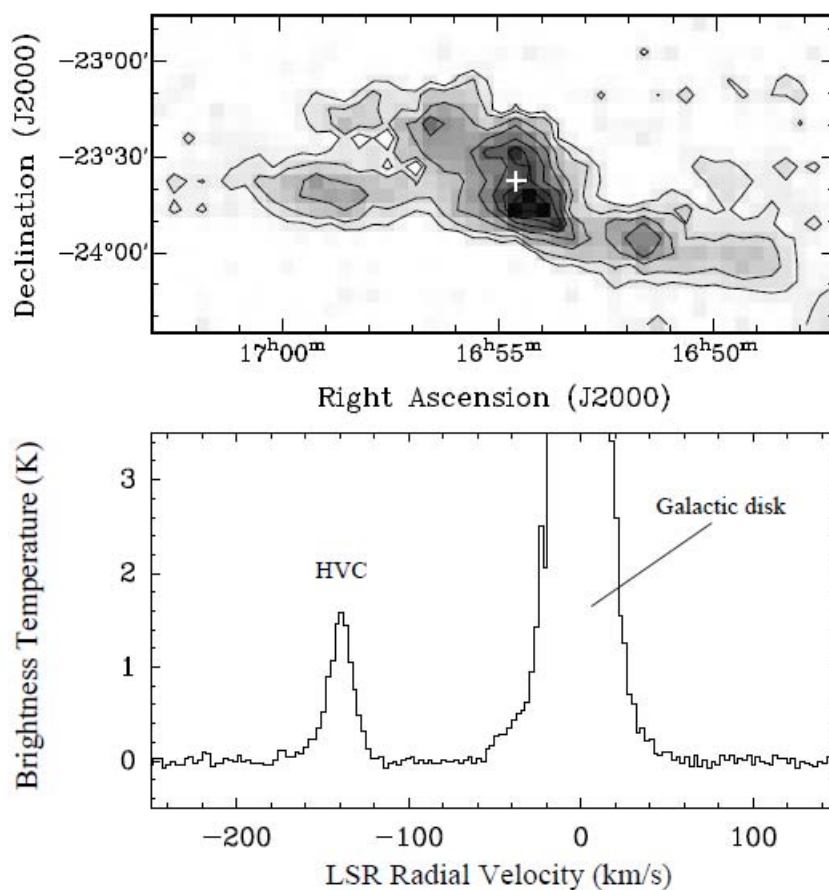
$$\frac{SFR}{[M_{\odot}]} = \frac{L(H\alpha)}{[1,26 \times 10^{41} \text{ ergs}^{-1}]} \quad (5.2)$$

A csillagközi gáz porral kevert, a csillagközi por a barionos csillagközi anyagban nagyjából 1 tömegszázaléknyi. A por méreteloszlása, anyagi minősége és gerjesztettségi állapota a 3 fő fázisban jelentősen eltér. A por, a teljes infravörös tartományon folytonos emissziót, jellegzetes profilú szilikát elnyelési sávokat, illetve policiklikus aromás szénhidrogéneknek tulajdonított emissziós vonalakat/sávokat mutat. A spirálgalaxisok infravörös fényét elsősorban a por által „reprocessált” csillagfény adja. Ennek megfelelően az aktívabb csillagkeletkezést mutató galaxisok az infravörös luminozitása is jelentősebb. Kennicutt et al. (1998) szerint az L_{FIR} távoli-infravörös luminozitás és a csillagkeletkezése ráta kapcsolata:

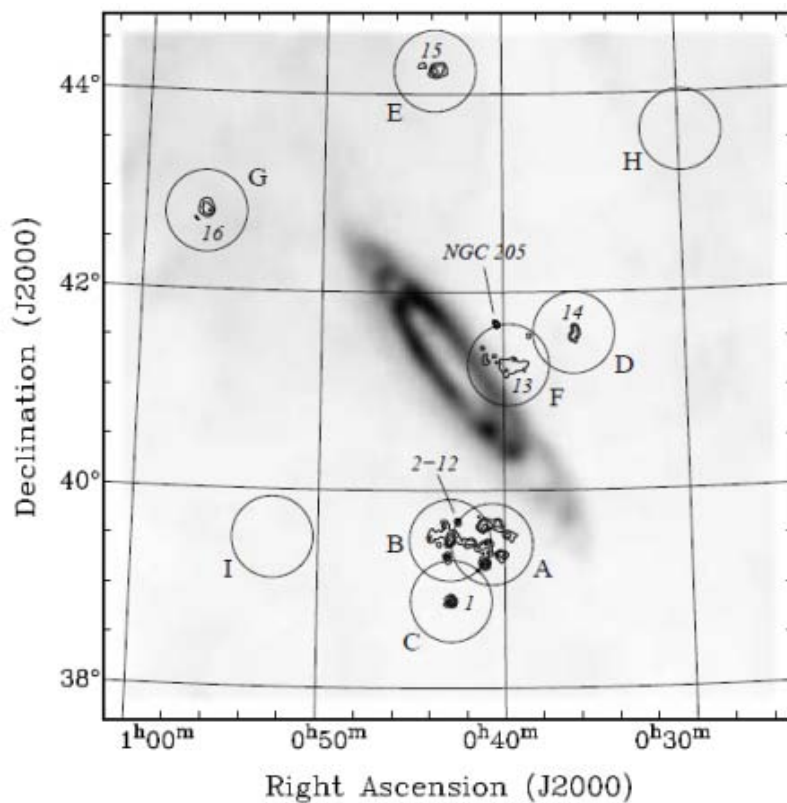
$$\frac{SFR}{[M_{\odot}]} = \frac{L_{FIR}}{[5,8 \times 10^9 L_{\odot}]} \quad (5.3)$$

A csillagközi anyag eloszlása a spirálgalaxisokban nem egyenletes, az elsősorban a korongban található, különös tekintettel a hideg és meleg komponensekre, kis skálamagasságú ($h \approx 150 \text{ pc}$) exponenciális eloszlással. A forró komponens ugyanakkor nagy tömegben van jelen a korong-halo határon és a halokban. Kisebb skálákon a korong csillagközi anyagában hierarchikus felhőstruktúrát és forró gázzal kitöltött kisebb-nagyobb ($1 \text{ pc} < d_{\text{üreg}} < 150 \text{ pc}$) üregeket találunk. A felhőrendszer fő elemei: HI szuperfelhőkben ($100 \text{ pc} < d_{\text{felhő}} < 150 \text{ pc}$) óriás molekulafelhők ($> 10^5$ naptömeg); azokban kisebb felhők; melyekben sűrű, hideg felhőmagok ($T_{\text{kin}} \approx 10 \text{ K}$, $n(\text{H}_2) > 10^3 \text{ cm}^{-3}$) találhatóak.

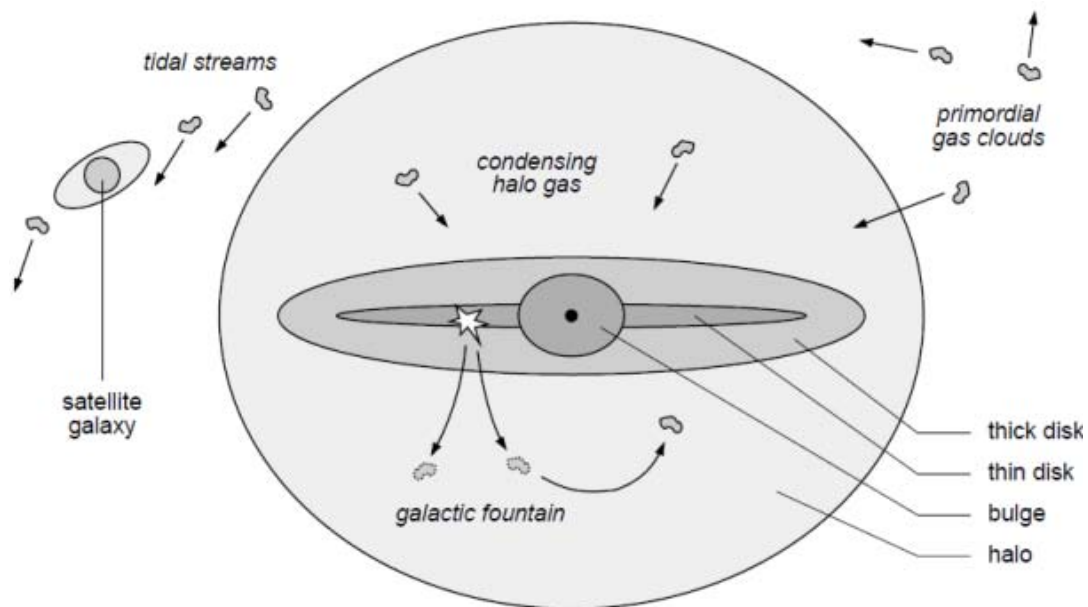
Vannak elkülönülő csillagközi felhők, és ezek a korong-halo határon, sőt a halóban is előfordulnak. Utóbbiak nagy pekuliáris sebessége alapján azt gondoljuk, hogy vagy a korongból kidobott, vagy az extragalaktikus térből befogott anyag lehet (lásd 5.10, 5.11. és 5.12. ábrák).



5.10. ábra: Nagy sebességű felhő (high velocity cloud, HVC) a Tejútrendszerben. Felül a számított HI oszlopsűrűség térképen a kontúrok: $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, majd $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ -től $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ lépésközzel. Az alsó spektrumon a HVC spektrumvonal Doppler eltolódásából (kb. 140 km/s) látható, hogy az nem része a korongnak.



5.11. ábra: Nagy sebességű HI felhők az M31 halojában. A kontúrok a HI gáz oszlopsűrűségét jelzik (Westmeier 2007).



5.12. ábra: A nagy sebességű felhők lehetséges eredete (Westmeier 2007 alapján)

5.5. Forgás és rotációs görbe

5.5.1. Nyírási és forgási együtthatók, nyírási ráta

A korong forgását leírva bevezetjük az $A(R_\theta)$ Oort-féle nyírási együtthatót (*Oort's first, shear constant*), ami egy kitüntetett R_θ sugárnál a $V(R)$ körsebesség R szerinti deriváltja és az $\omega(R_\theta)$ szögsebesség különbségének fele. Az S nyírási ráta pedig az Oort-féle nyírási együttható és a szögsebesség hányadosa, azaz:

$$A(R_\theta) = \frac{1}{2} \left(\left[\frac{dV(R)}{dR} \right]_{R_\theta} - \frac{V_\theta}{R_\theta} \right) \quad \text{ahol} \quad \omega(R_\theta) = \frac{V_\theta}{R_\theta} \quad (5.4)$$

$$S(R) = \frac{A(R)}{\omega(R)} = \left(1 - \frac{R}{V(R)} \frac{dV}{dR} \right) \quad (5.5)$$

Egy mereven forgó testre a nyírási együttható és így a nyírási ráta is zérus, hiszen minden R_θ sugárnál:

$$\left[\frac{dV(R)}{dR} \right]_{R_\theta} = \frac{V_\theta}{R_\theta} \quad \text{tehát} \quad A(R_\theta) = 0 \quad (5.6)$$

Ha $V(R) = V_{\text{flat}}$ állandó, azaz a „rotációs görbe lapos” (*flat rotation curve*), akkor:

$$A = \frac{V_{\text{flat}}}{R} \quad (5.7)$$

Az M31-re $R_\theta = 10$ kpc-nél a nyírási ráta $S(10 \text{ kpc}) = A / \omega = 0.54 \pm 0.02$ (lásd Seigar et al. 2008).

A B Oort-féle rotációs, avagy forgási együttható:

$$B(R_\theta) = -\frac{1}{2} \left(\left[\frac{dV(R)}{dR} \right]_{R_\theta} + \frac{V_\theta}{R_\theta} \right) \quad \text{ahol} \quad \omega(R_\theta) = V_\theta / R_\theta \quad (5.8)$$

Merev testre (5.7) alkalmazásával:

$$B(R_\theta) = -\frac{V_\theta}{R_\theta} = -\omega \quad (5.9)$$

5.5.2. A rotációs görbe

A rotációs görbéről és a meghatározásához vezető radiális sebesség mérésről lásd bővebben a 8.2.1. és 8.2.2. alfejezetekben. A rotációs görbét a spirálgalaxis alrendszerének tömegeloszlását modellezve előállított sebesség profillal illesztjük (lásd 8. fejezetés 8.29 ábra).

5.6. A korong stabilitása

A korong komponensekben a csillagok σ_z vertikális sebesség szórása a vékony korongra: $\sigma_z \approx 25$ km/s, a vastag korongra: $\sigma_z \approx 50$ km/s. A sebesség szórásból a korong $\Sigma_{z=|z|}$ felületi tömegsűrűségére is következtethetünk:

$$\sigma_z^2 = 2\pi G z_0 \Sigma_{tejjes} \quad (5.10)$$

A korong helyi stabilitása attól függ, hogy radiális sebesség perturbáció miatt nem távol-e gyorsabban, mint a szökési sebesség, illetve, hogy van-e akkora a keringési sebesség az adott rádiusznál, hogy ne következzen be a gravitációs kollapszus (lásd 5.13. ábra).

$$t_{kollapszus} \approx \frac{R}{V} \approx \frac{R}{(GM/R)^{1/2}} \approx (R^3/GM)^{1/2} \approx (R/G\Sigma_{tejjes})^{1/2} \quad (5.11)$$

$$t_{szökési} \approx \frac{R}{\sigma} \quad (5.12)$$

A kollapszus $t_{kollapszus} < t_{szökési}$ esetén következik be, azaz:

$$(R/G\Sigma_{tejjes})^{1/2} < R/\sigma \quad (5.13)$$

Ahonnán R kifejezhető, és megadható a diszperzió elleni stabilitáshoz szükséges kritikus méret:

$$R_J < \sigma^2 / G\Sigma_{tejjes} \quad (5.14)$$

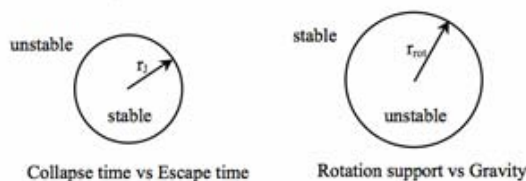
Tekintsünk most egy forgó korongot, ebben a lokális szögsebességet az Oort-féle B (rotációs) konstans adja meg.

A lokális stabilitás feltétele, hogy $F_{gravit} < F_{centrifugális}$, azaz:

$$RB^2 > GM/R^2 = G\Sigma_{tejjes} \quad (5.15)$$

A gravitációs kollapszus elleni forgási stabilitás feltétele a kritikus sugárral kifejezve:

$$R_{rot} > G\Sigma_{tejjes} / B^2 \quad (5.16)$$



5.13. ábra: A stabil zónák sematikus rajza. Ha $r_J > r_{rot}$, akkor általános a stabilitás.

A korong R-nél instabil, ha $R_{rot} > R > R_J$, illetve lokálisan stabil, ha $R_J > R_{rot}$ (lásd 5.13. ábra), azaz:

$$\sigma^2 / G\Sigma_{tejjes} > G\Sigma_{tejjes} / B^2 \quad (5.17)$$

$$Q^2 \equiv (\sigma B / G\Sigma_{tejjes})^2 > 1 \quad \text{a stabilitás feltétele az 5.17 átrendezésével.} \quad (5.18)$$

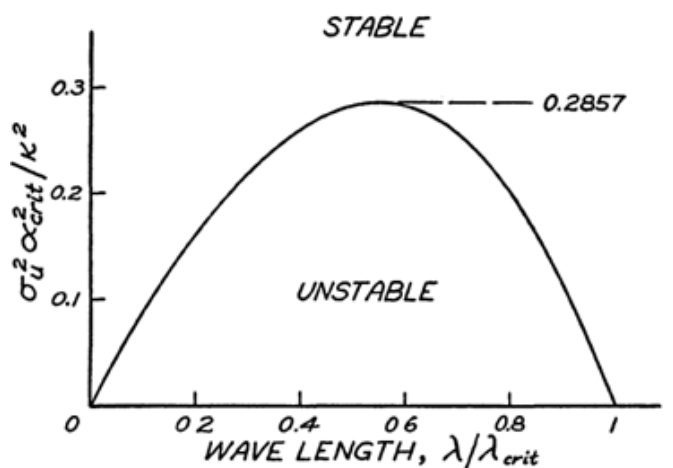
A korongban történő mozgásokat leírhatjuk, mint egy elliptikus epiciklikus mozgást melyre Ω a keringés szögsebessége, κ pedig az epiciklikus szögsebesség, melyekre általában igaz, hogy:

$$\Omega < \kappa < 2\Omega \quad (5.19)$$

Teljesül továbbá, hogy $B \approx \kappa/3$, ahonnan:

$$Q \approx \sigma\kappa / 3G\Sigma_{\text{teljes}} \quad (5.20)$$

A korong lokálisan stabil egy R sugárnál, ha a stabilitás Q Toomre-féle paraméterére $Q > 1$ (Toomre 1964).



5.14. ábra: A stabil és nem stabil perturbációkat elválasztó görbe Toomre eredeti publikációjában (Toomre 1964).

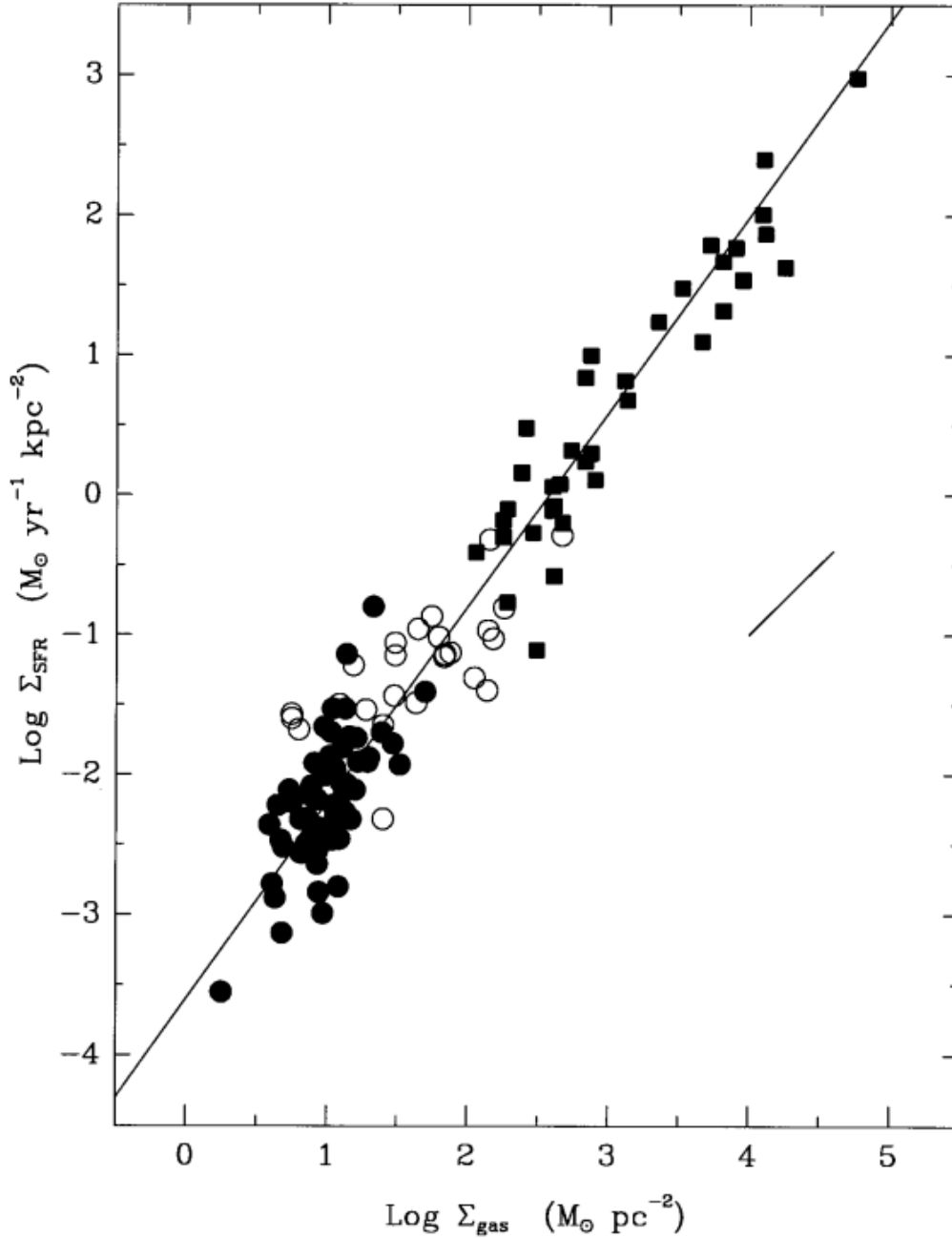
5.7. Csillagkeletkezés

5.7.1. A Schmidt-törvény

Maarten Schmidt (1959) fél-analitikus megfontolása szerint a korongos galaxisok korongra vetített átlagos csillagkeletkezési rátája a korongra vetített felületegységre eső átlagos teljes gáztömeg ζ hatványával arányos, ez az úgynevezett *globális Schmidt-törvény* (*Global Schmidt Law*):

$$\sum_{\text{SFR}} = A \sum_{\text{gáz}}^{\zeta} \quad \text{ahol } 1 < \zeta < 2 \quad (5.21)$$

A kitevő a csillagkeletkezés választott nyomjelzője szerint különböző lehet, de értéke 1 és 2 közé esik. Kennicutt (1997) szerint a ζ kitevő értéke 1,4 (lásd 5.10. ábra) a normál korongos galaxisok és csillagontó galaxisokra.



5.13. ábra: A globális Schmidt-törvény a galaxisok csillagkeletkezése és csillagközi anyag tartalma között. Jelölések: tele körök – normál spirálgalaxisok; üres körök – spirálgalaxisok középponti régiói; tele négyzetek – csillagontó (starburst) galaxisok. A legkisebb négyzetek módszerével illesztett egyenes meredeksége $\zeta = 1,4$ (Kennicutt 1998), és így (5.21):

$$\Sigma_{\text{SFR}} = (2,5 \pm 0,7) \left(\frac{\Sigma_{\text{gáz}}^{1,4 \pm 0,15}}{[1 M_{\text{Nap}} \text{pc}^{-2}]} \right)^{1,4 \pm 0,7} M_{\text{Nap}} \text{év}^{-1} \text{kpc}^{-2} \quad (5.22)$$

5.7.2. Spirálkarok és csillagkeletkezés

A spirálkarokat megjelenési formájuk szerint (Elmegreen & Elmegreen 1987) 3 fő csoportba osztjuk:

- szabályos (grand design) – két fő spirálkar

- pelyhes (flocculent) – kaotikus (például az NGC 5055 a „Napralforgó Galaxis”)
- sok-karú (multiple arm) – erősebb belső karok és kaotikus külső



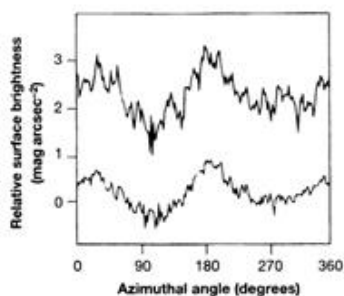
5.14. ábra: Az NGC5055 (M63, „Napralforgó”) spirálgalaxis kompozit képe B, V és H α sávú képekből (Satoshi Miyazaki, NAOJ, Subaru Telescope Suprime-Cam, http://www.naoj.org/Pressrelease/2000/06/22/M63_250.jpg)

A spirálkarokban csak legfeljebb 10%-kal nagyobb a korong szimmetriasíkjára vetített felületi sűrűség a környezetükhöz képest az adott galaktocentrikus távolságnál miközben felületegységre vetített energiatermelésük sokkal jelentősebb. A spirálkar felületi fényessége 1-2 mag/arcsec²-cel nagyobb lehet környezeténél (lásd 5.15. ábra).

A kar és kar-közi felületi fényesség kontraszt μ_I helyett bevezetjük az A Elmegreen-féle kontraszt paramétert:

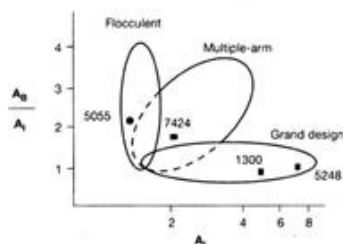
$$A_I = 10^{0,4 \mu_I} \quad (5.23a)$$

$$A_B = 10^{0,4 \mu_B} \quad (5.23b)$$



5.15. ábra: A felületi fényesség kontraszt a spirálkaroknál (Elmegreen & Elmegreen 1987).

A spirálkar morfológiai alosztályok természetesen az Elmegreen-féle kontraszt paraméter szerint is elkülönülnek (lásd 5.16. ábra).



5.16. ábra: A szabályos (grand design), pelyhes (flocculent) és sok-karú (multiple arm) spirálgalaxis altípusok elkülönülése az Elmegreen-féle kontraszt paraméter az 5.23 egyenletek szerint (Elmegreen & Elmegreen 1987).

A spirálkarok nem tömegük, hanem a spirálkarok mentén zajló csillagkeletkezés miatt fényesebbek a karok közti térrészeknél. A spirálkarok Lin-Shu féle elmélete szerint egy sűrűség hullám forog merev testként a korongon. A sűrűség hullám hozza létre a spirálkar indikátorok lokális sűrűsödését (csillagközi molekuláris gáz, fiatal nagytömegű csillagok, HII zónák).

Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:

Elmegreen, D. M. & Elmegreen, B. G. 1984: „Blue and near-infrared surface photometry of spiral structure in 34 nonbarred grand design and flocculent galaxies”, *ApJS*...54..127E

Elmegreen, D. M. & Elmegreen, B. G. 1987: „Arm classifications for spiral galaxies”, *ApJ*...314...3E

Elmegreen, D. M. & Elmegreen, B. G. 1987: „H I superclouds in the inner Galaxy”, *ApJ*...320..182E

Gilmore, G. & Reid, N. 1983: „New light on faint stars. III - Galactic structure towards the South Pole and the Galactic thick disc”, 1983MNRAS.202.1025G

Ibata, R. et al. 2011: „On the accretion origin of a vast extended stellar disk around the Andromeda galaxy”, *ApJ*, 634, 287, http://iopscience.iop.org/0004-637X/634/1/287/pdf/0004-637X_634_1_287.pdf

Kennicutt, R.C. 1998: „The Global Schmidt Law in Star-forming Galaxies”, *ARA&A*..36..189K

Kirihara, T. et al, 2013: „Resolving the outer density profile of dark matter halo in Andromeda galaxy”, <http://arxiv.org/pdf/1305.2007v1.pdf>

Koch, A. et al. 2007: „Kinematic and chemical constraints on the formation of M31's inner halo structures”, in "The Milky Way Halo - Stars and Gas", K.S. de Boer & P. Kroupa (eds.);

Seigar, M. S.; & James, P. A. 1998: „The structure of spiral galaxies - I. Near-infrared properties of bulges, discs and bars”, *MNRAS*.299..672S

Seigar, M. S.; & James, P. A. 1998: „The structure of spiral galaxies - II. Near-infrared properties of spiral arms”, *MNRAS*.299..685S

Seigar, M.S. 2007: „A New Mass Model for M31”, *IAUS*..235..135S

Seigar, M.S. et al. 2008: „A revised Λ CDM mass model for the Andromeda Galaxy”, *MNRAS*.389.1911S

Schmidt, M. 1959: „*The Rate of Star Formation.*”, [ApJ...129..243S](#)

Tsikoudi V. 1980: „*Photometry and structure of lenticular galaxies. II - NGC 4111 and NGC 4762*”, [ApJS...43..365T](#)

Toomre, A. 1964: „*On the gravitational stability of a disk of stars*”, [ApJ...139.1217T](#)

Westmeier, T. 2007: „*The Relics of Structure Formation - High-Velocity Clouds around the Andromeda Galaxy and the Milky Way*”, PhD Thesis, Uni. Bonn.

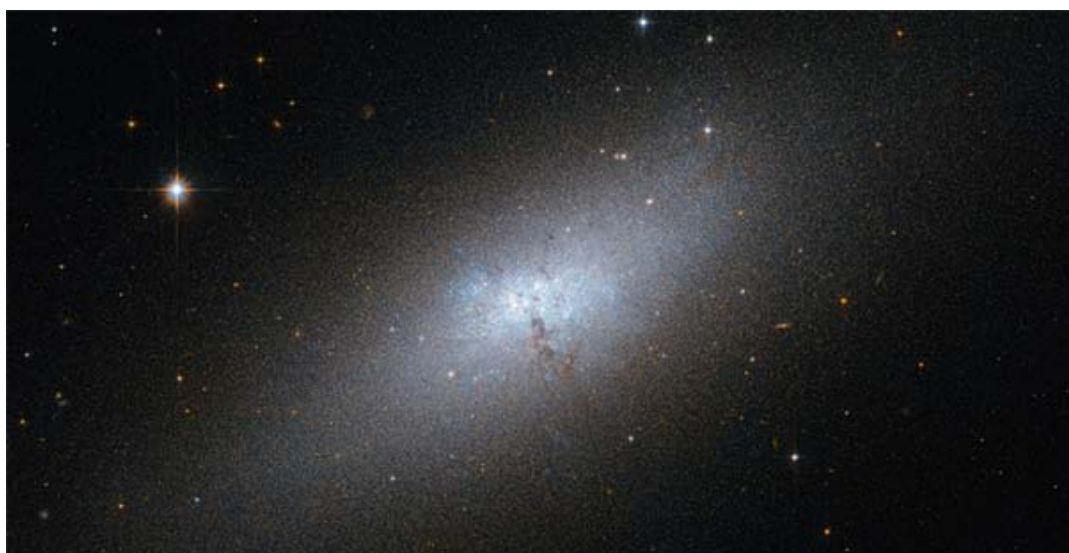
6. fejezet - Anomális galaxisok: kompakt és irreguláris rendszerek

6.1. Kék kompakt galaxisok

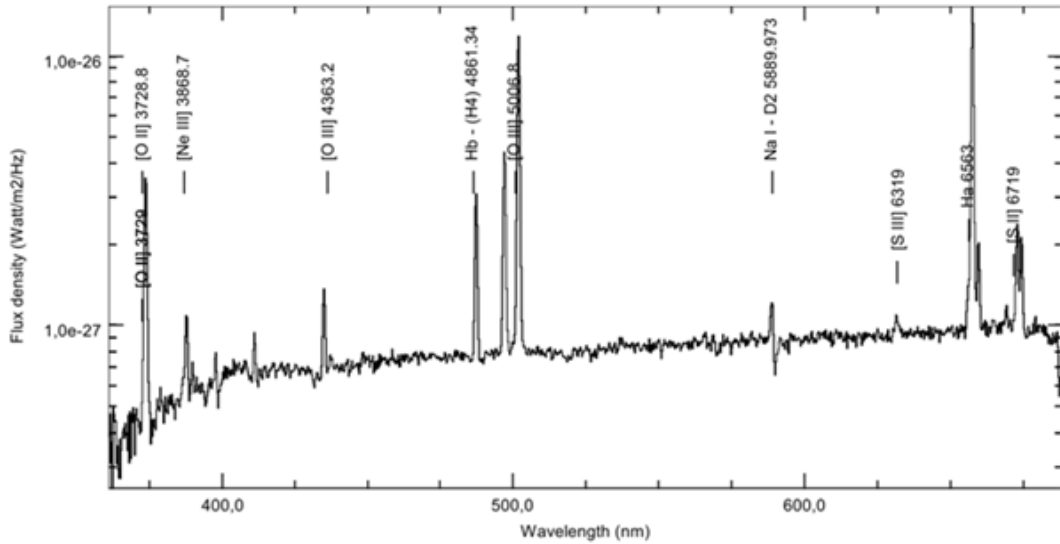
A kék kompakt galaxisokat (Blue Compact Dwarf, BCD) mint osztályt Sargent és Searle (1970) különítették el, és mint extragalaktikus HII zónákat említették ezeket csillagtartalmuk és spektrumuk miatt. A kék kompakt galaxisok a korai leírások szerint aprók, néhány száz parsec átmérőjükkel, és kis tömegűek ($\sim 10^9 M_{\odot}$). Halvány objektumok, ezért nagyon távoliakat nehéz felfedezni, de az első felfedezettek fényesebbek $M_p \sim -14$. A kék kompakt galaxisok természetesen kékek, színindexük:

$$0 < (B-V)_0 < 0,4 \quad (6.1)$$

Erős emissziós vonalaikból egyszerűen következtethetünk He, N, O, Ne és S tartalmukra (lásd 6.2. ábra). Pontosabb vizsgálattal megállapíthatjuk, hogy a kék kompakt galaxisok alapvetően fémszegények. Példaként az egyik legközelebbi képviselőjét mutatjuk be ennek a galaxis osztálynak, a John Frederick William Herschel által felfedezett NGC5253-at.



6.1. ábra: Az NGC5253 galaxis az egyik legközelebbi ismert kék kompakt galaxis 3.667 (+/- 0.542) Mpc távolságban, a Centaurus csillagképben. Az NGC5253 mérete: 5.8kpc \times 2.2kpc. (NED és ESA/Hubble & NASA, <http://www.spacetelescope.org/images/potw1248a/>)

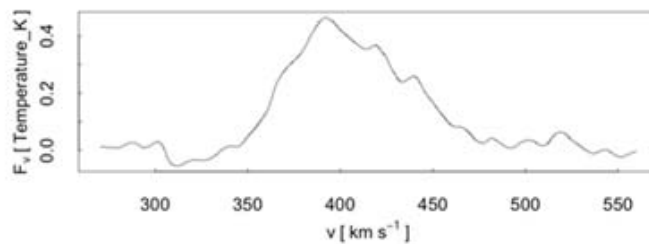


6.2. ábra: Az NGC5253 galaxis spektruma a hidrogén Balmer sorozatával és fémvonalakkal emisszióban (az NED Specview felhasználásával)

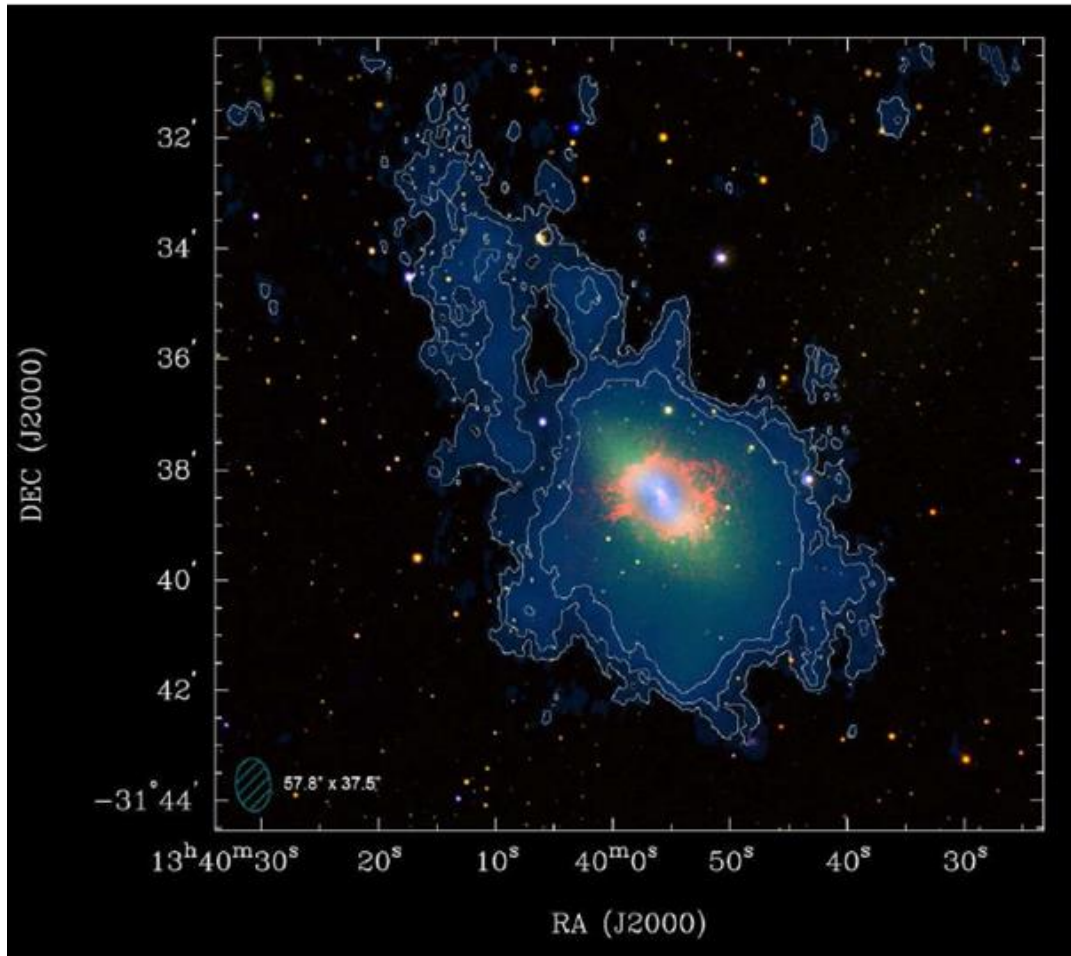
A BCD klasszifikáció kritériumai (Gil de Paz 2003):

- *kék*, azaz $\mu_{B, \text{peak}} - \mu_{R, \text{peak}} \leq 1$,
- *kompakt*, $\mu_{B, \text{peak}} < 22 \text{ mag/arcsec}^2$
- *törpe*, $M_K > -21 \text{ mag}$.

A feltevések szerint a kék kompakt galaxisok és a korai Univerzum elemgyakorisága hasonló, ezért tanulmányozásuk a kozmológiai modellek egyik alap paraméterének a relatív fém és hélium tartalom meghatározásához vezethet el. A másik fontos várakozás, hogy pontosíthatjuk a csillagok első generációjának keletkezési modelljeit. A kék kompakt galaxisokban a korai Univerzumban uralkodó feltételekhez hasonlókat találunk (alacsony fémesség és jelentős semleges hidrogén tartalom), és ezen körülmények között keletkeznek a csillagok. Ez a csillagkeletkezés heves, a csillagontó (starburst) jelenségre hasonlít. A semleges hidrogén tartalom a látható tömeg 20%, vagy több is lehet, mint például az NGC5253 esetében (López-Sánchez et al. 2012)

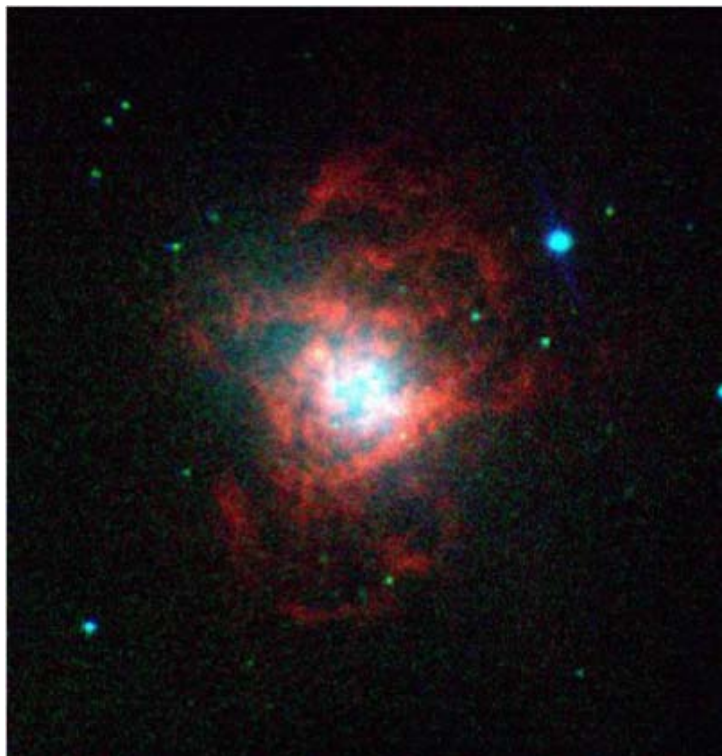


6.3. ábra: Az NGC5253 galaxis HI spektruma, mely alapján a semleges hidrogén becsült tömege $3 \times 10^8 M_{\odot}$ (Whiteoak & Gardner 1977, Fig. 3, és NED).

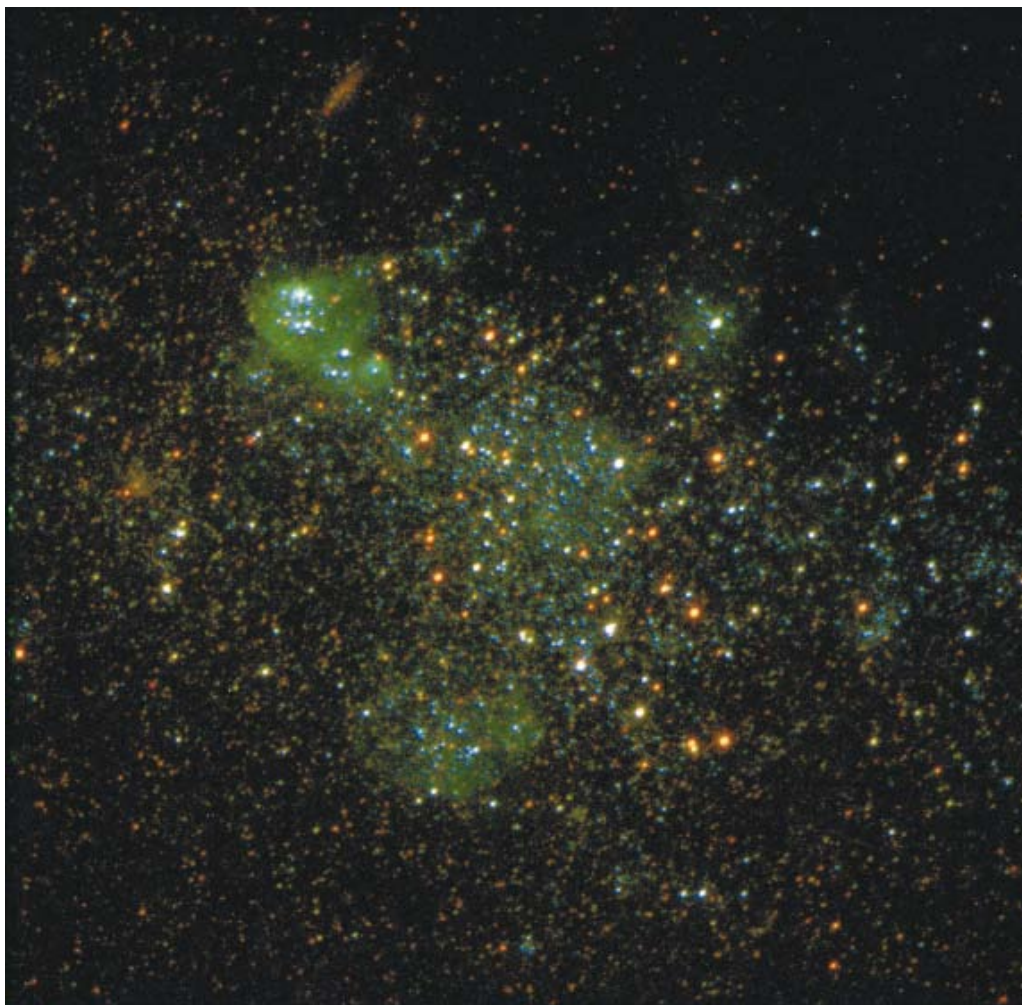


6.4. ábra: A semleges hidrogén eloszlása az NGC5253 kék kompakt galaxis körül. A kompozit képen a színekódolás a következő: világoskék – ultraibolya, zöld = R sáv (optikai, Meurer et al. 2006) vörös = közeli infravörös H sáv (2MASS), narancs = közeli infravörös J sáv (2MASS), sötétkék HI 21cm (ATKA, López-Sánchez et al. 2012). A HI kontúrok: 0.1, 0.18 és 0.3 $\text{Jybeam}^{-1}\text{kms}^{-1}$, a nyálbábméret a HI 21cm-es mérésnél – a bal alsó sarokban.

Az NGC 5253 galaxisba feltételezhetően jelentős tömegű, diffúz, alacsony fémességű HI felhő hullik be, és ez egy erős csillagotó tevékenységet generál (lásd 4.3. ábra és López-Sánchez et al. 2012) a galaxisban. A heves csillagkeletkezést hidrogén Balmer alfa, röntgen és ultraibolya emisszió is kíséri/jelzi.



6.5. ábra: Az NGC1705 kék kompakt törpe (BCD) galaxis kompozit képe. Kék: a B sávú kontinuum, zöld: R sávú kontinuum, vörös: H α . (Meurer)



6.6. ábra: Az UGC 6456 (VII Zw 403) közeli kék kompakt törpe galaxis kompozit képe a HST F814W, F555W és F336W szűrőivel készített felvételeiből (Schulte-Ladbeck et al. 1998).

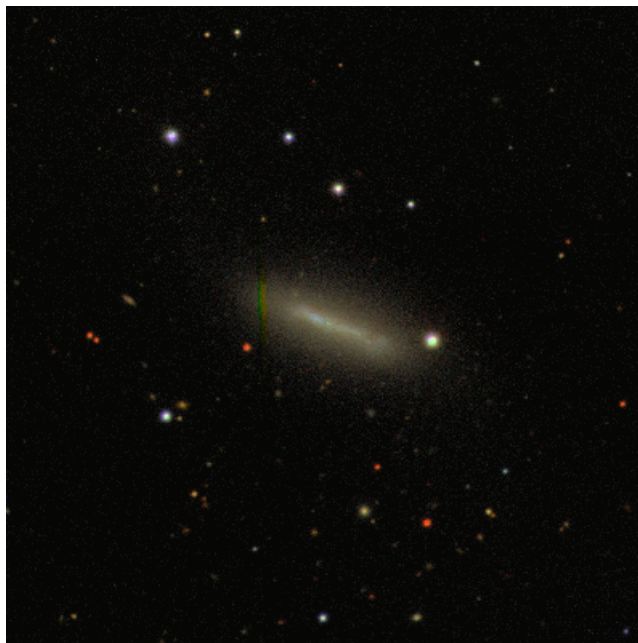
6.2. Irreguláris galaxisok

A látható tartományban megfigyelve szimmetria tulajdonságokat nem mutató galaxisokat a szabálytalanok Irr I és Irr II Hubble osztályaiba soroljuk. Az Irr I típus mutat ugyan belső struktúrát, de szimmetria nélkül. Ha megjelennek benne spirál struktúra elemek, ekkor Sm, ha nem akkor Im altípusú a de Vaucouleurs osztályozás szerint. Az altípus megjelölésben az „m” („Magellanic”) a Magellán Felhőkre utal. Az Irr I típus kapcsolódik a Hubble „hangvillához”. Ha semmi strukturálódást nem látunk akkor Irr II típusúnak mondjuk a galaxist. További morfológiai alosztályok:

- I(s): s-alakú változatok
- I0: nem-Magellán típusú irreguláris
- IA: egyszerű / küllő nélküli
- IAB: az IA és IB közti átmeneti osztály
- IB: küllős irreguláris
- compact Irr: kompakt irreguláris

Az Sm altípus képviselője a Nagy Magellán Felhő (LMC), melyet ma SBm azaz küllős Magellán-spirálként tartjuk számon. A galaxis kölcsönhatásban tömeget veszített, és rendezetlenebbé vált kisebb spirálgalaxisok is az Sm

morfológiai alosztályba tartoznak. A Kis Magellán Felhő (SMC) Im típusú. Egy érdekes példa az AM 1357-504 melyet előbb IABm altípusú galaxisnak véltek, majd Côté et al. (1997) planetáris ködnek klasszifikálta.



6.7. ábra: Az NGC 5360 I0 morfológiai osztályú irreguláris galaxis (éléről) SDSS g,r,i kompozit képe. Látszik a korong léte.

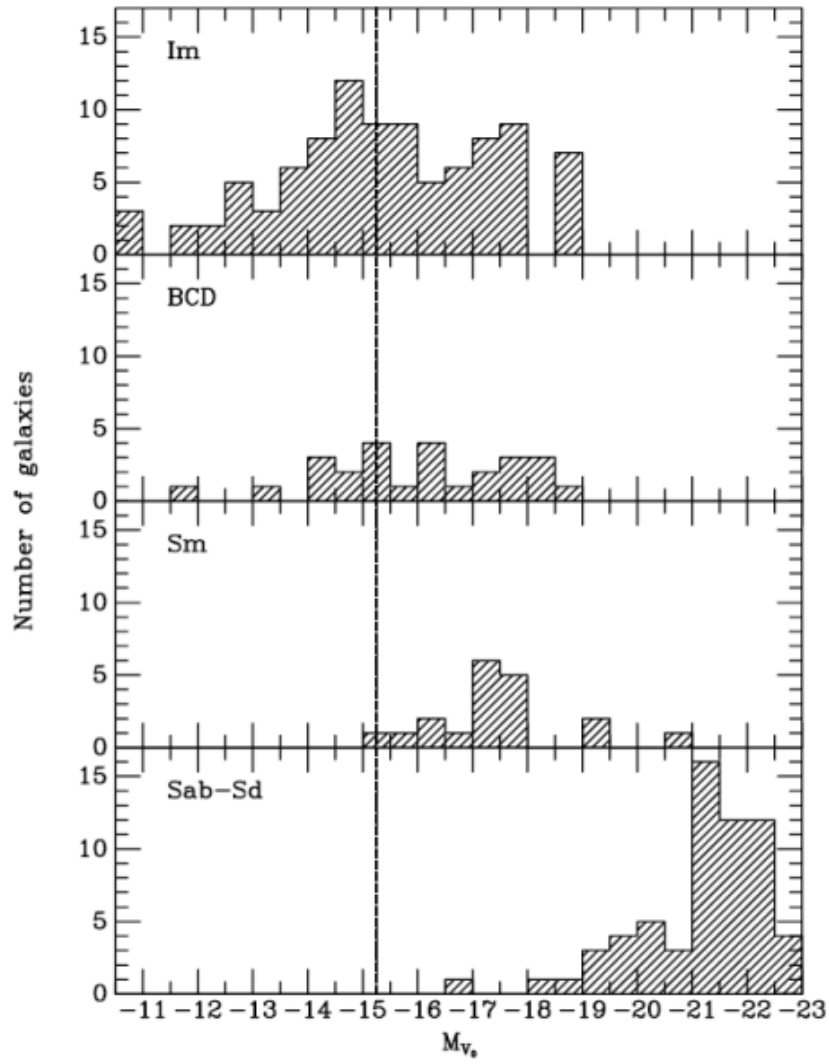


6.8. ábra: Az NGC 3077 I0 pekuliáris típusú irreguláris galaxis SDSS g,r,i kompozit képe.

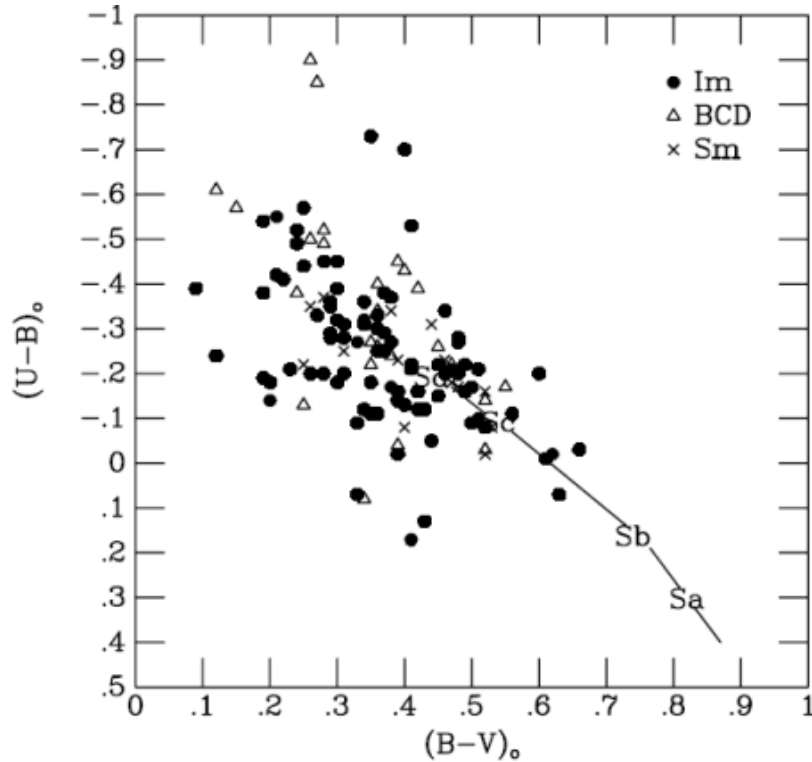


6.9. ábra: Az IC 10 egy IBm típusú galaxis (http://en.wikipedia.org/wiki/File:IC10_BVHa.jpg)

Az irreguláris galaxisok abszolút fényessége és tömege tág határok között változik. Az Sm és Im típusúak abszolút fényesség eloszlását lásd a 6.10. ábrán. Látszik, hogy általában halványabbak a spirálgalaxisoknál. Integrális színindexekben nagy a szórás, de általában kékebbek.

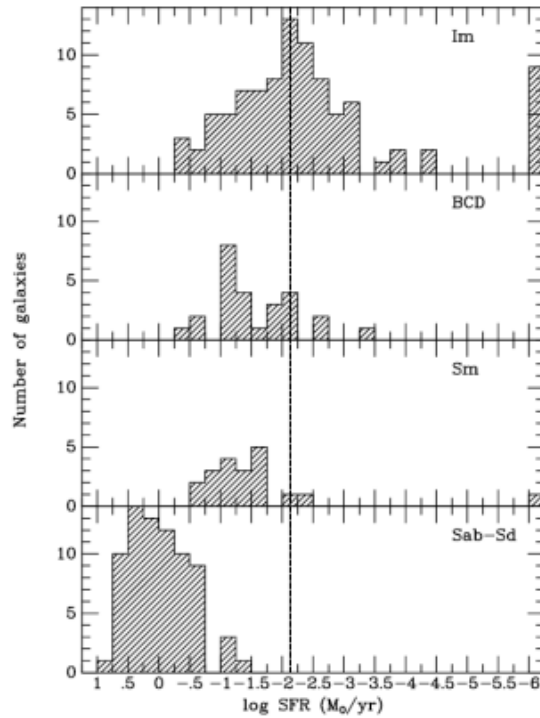


6.10. ábra: Az Sm és Im irregulárisok, a kék kompakt (BCD) és a spirálgalaxisok abszolút fényessége. A galaxis számot a vörösödés mentes V sávú abszolút magnitúdó függvényében ábrázoltuk. (Hunter 2008).

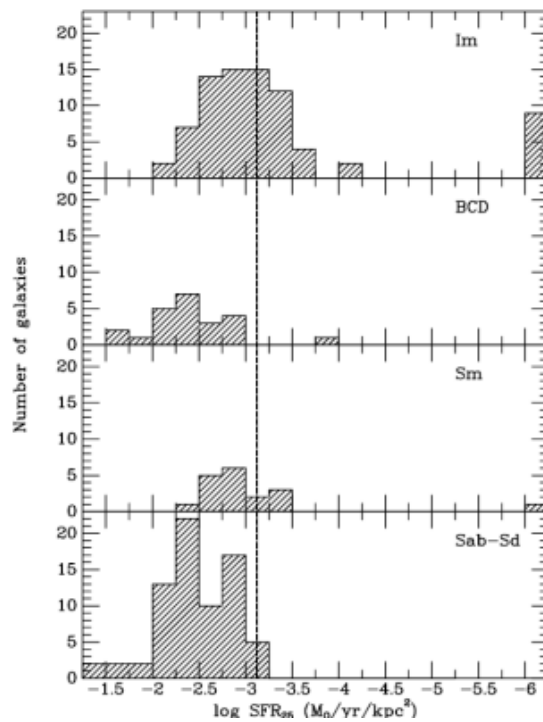


6.11. ábra: Az Sm és Im irregulárisok, a kék kompakt (BCD) és a spirálgalaxisok vörösödés-mentes színindexei (Hunter 2008).

Az irreguláris galaxisok is lapultak, mint a koronggal rendelkező galaxisok, de ezekből részben, vagy teljesen hiányzik a spirálszerkezet, ezért mutatnak a klasszikus spirálgalaxisoktól nagyon különböző szerkezetet. Jelentős csillagközi anyag tartalmuk van. Fiatal és öregebb csillagok is alkotják, némelyikben nagyon aktív csillagkeletkezés is zajlik. Természetesen a csillagkeletkezési ráta a felületegységre vetítve lesz összehasonlítható a spirálgalaxisokéval (lásd 6.12. a és b ábrák). Az irreguláris galaxisokban lehetséges a galaktikus sűrűség hullámok nélküli csillagkeletkezés vizsgálata, ugyanakkor a gravitációs kölcsönhatások miatt bennük a csillagkeletkezés gyakran nem mentes az extragalaktikus hatásoktól.

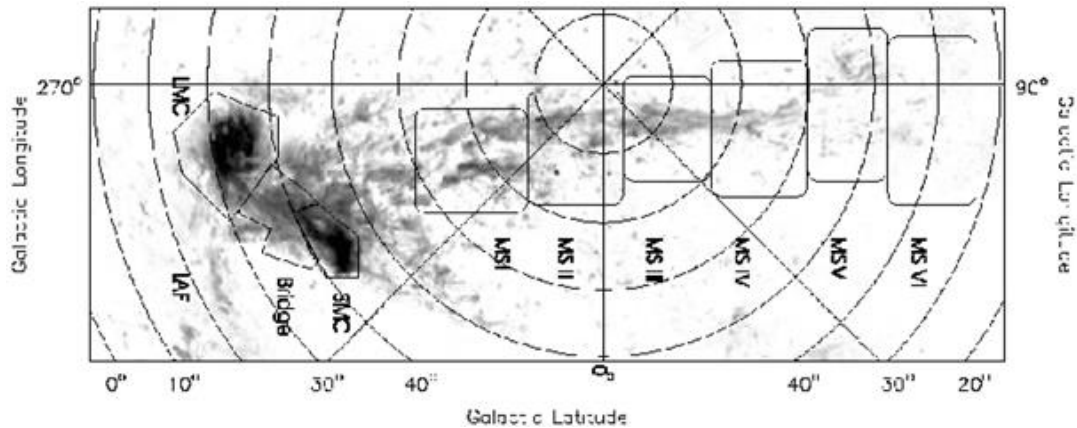


6.12. a) ábra: Az Sm és Im irregulárisok, a kék kompakt (BCD) és a spirálgalaxisok csillagkeletkezési rátája – teljes galaxis (Hunter 2008).



6.12. b) ábra: Az Sm és Im irregulárisok, a kék kompakt (BCD) és a spirálgalaxisok csillagkeletkezési rátája – felületegységre vetítve (Hunter 2008).

Az irreguláris galaxisok csillag- és csillagközi anyag tartalmának felderítése azért is fontos, mert ezek táplálják az óriás spirálgalaxisokat, melyek a szatelita irregulárisaik bekebelezésével is növekednek. A Tejútrendszer és az Magellán Felhők közti anyagátadás az ún. *Magellán Áramlás (Magellanic Stream)*. Ezt a 180 kpc hosszú, alapvetően hidrogén gázból ($\approx 2 \times 10^8$ naptömeg) álló anyaghidat két részre bonthatjuk. Az egyik az SMC-ből korábban a másik az LMC-ből a közelmúltban az árapálykeltő erők hatására elragadott gáz.



6.13. ábra: A hidrogén gáz oszlopsűrűsége HI 21cm-es mérések alapján. Látható a Magellán Felhők (LMC és SMC) közötti „gázhid” (Bridge), és a Magellán Áramlás (Magellanic Stream, MS), utóbbi 6 csomóra bomlik. Az LAF (leading arm feature) felirat a feltehetően gravitációs kölcsönhatás által az LMC-ből kipturbált anyagot jelzi (<http://ned.ipac.caltech.edu/level5/March04/Mare1/Figures/figure5.jpg>).

6.3. Ultrakompakt galaxisok

Az ultrakompakt törpegalaxisok (ultra-compact dwarf, UCD) méretüket és tömegüket tekintve a gömbhalmazok és a törpe elliptikus galaxisok közé esnek. Abszolút fényességük és fél-fényesség sugaruk (half-light radius) rendre: $-9 > M_V > -14$ és $10 \text{ pc} < r_{50\%} < 100 \text{ pc}$. Az első példányokat Michael Hilker és munkatársai fedezték fel a Fornax galaxishalmazban (Hilker et al 1999). Lehetnek elkülönülten keletkezők, vagy ár-apály erők által kiszakított galaxis darabok. Egy különösen nagy felületi sűrűséget mutató egyed a Virgo galaxishalmaz NGC 4649 (M60) galaxisa közelében talált M60-UCD1. A 2×10^8 naptömeg tömegű galaxis mindössze $r_{50\%} = 24 \text{ pc}$ sugarú és közepében szuper nagytömegű fekete lyuk van (Strader et al. 2013).

Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:

Cote, S. et al. 1997: „Discovery of Numerous Dwarf Galaxies in the Two Nearest Groups of Galaxies.”, *AJ*...114.1313C

Gil de Paz, A. et al. 2003: „Palomar/Las Campanas Imaging Atlas of Blue Compact Dwarf Galaxies: I. Images and Integrated Photometry”, *ApJS*, 147, 29.

Gallagher, J. S., III & Hunter, D. A., 1984: „Structure and Evolution of Irregular Galaxies”, *ARA&A*..22...37G

Hilker, M., et al. 1999: „The central region of the Fornax cluster. II. Spectroscopy and radial velocities of member and background galaxies”, *A&AS*, 134, 75

Hunter, D. 2008: „Characteristics of Star Forming Regions in Irregular Galaxies”, *ASPC*..381...38H

López-Sánchez, Á. R. et al. 2012: „The intriguing HI gas in NGC 5253: an infall of a diffuse, low-metallicity HI cloud?”, *MNRAS*.419.1051L

Sargent, W.L.W., 1970: „A Spectroscopic Survey of Compact and Peculiar Galaxies”, *ApJ*...160..405S

Sargent, W.L.W., & Searle, L., 1970: „Isolated Extragalactic H II Regions”, *ApJ*. 162, 155

Schulte-Ladbeck, R.E. et al. 1998: „“Baade’s Red Sheet” resolved into stars with Hubble Space Telescope in the blue compact dwarf galaxy VII ZW 403”, *ApJ* 493, L23.

Strader, J. et al. 2013: “The densest galaxy”, *ApJ* 775, L6, doi:10.1088/2041-8205/775/1/L6

van der Marell, R.P. 2003: „*The Large Magellanic Cloud: structure and kinematics*”, in "The Local Group as an Astrophysical Laboratory", Proceedings of the May 2003 STSci Symposium, M. Livio, ed., Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Whiteoak, J. B., Gardner, F. F., 1977: „*Observations of Neutral Hydrogen in Bright Southern Galaxies*”, Australian J. Phys. vol. 30 p. 187

7. fejezet - Extragalaxis katalógusok, extragalaxis atlaszok

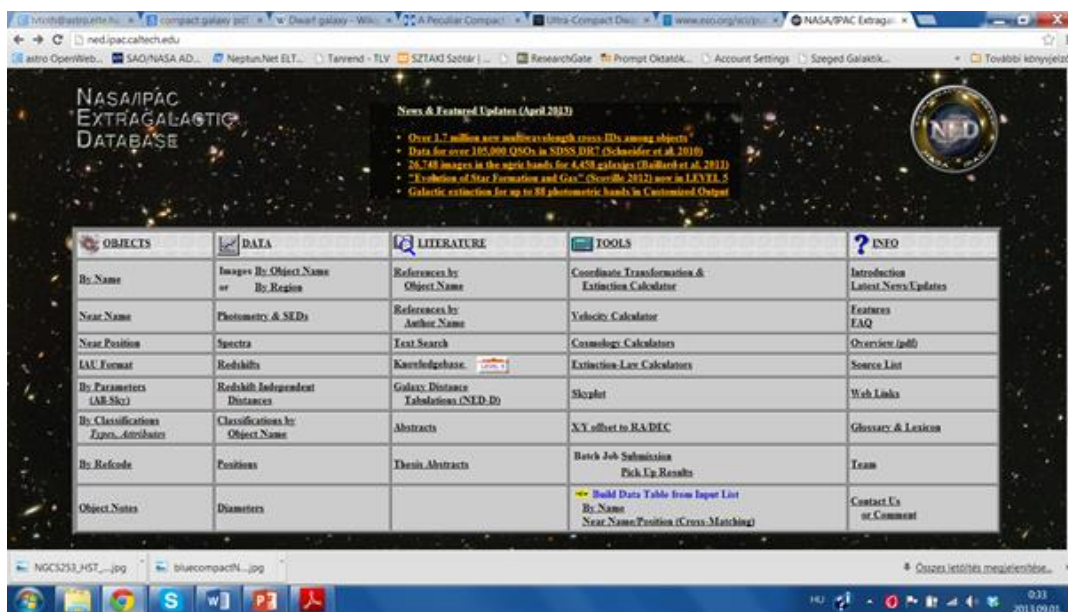
Bemutatunk egy általános extragalaktikus adatbázist a NED-t, illetve a fotografikus mérések alapján készített korábbi galaxis atlaszokat.

7.1. NED a NASA Extragalaktikus Adatbázisa

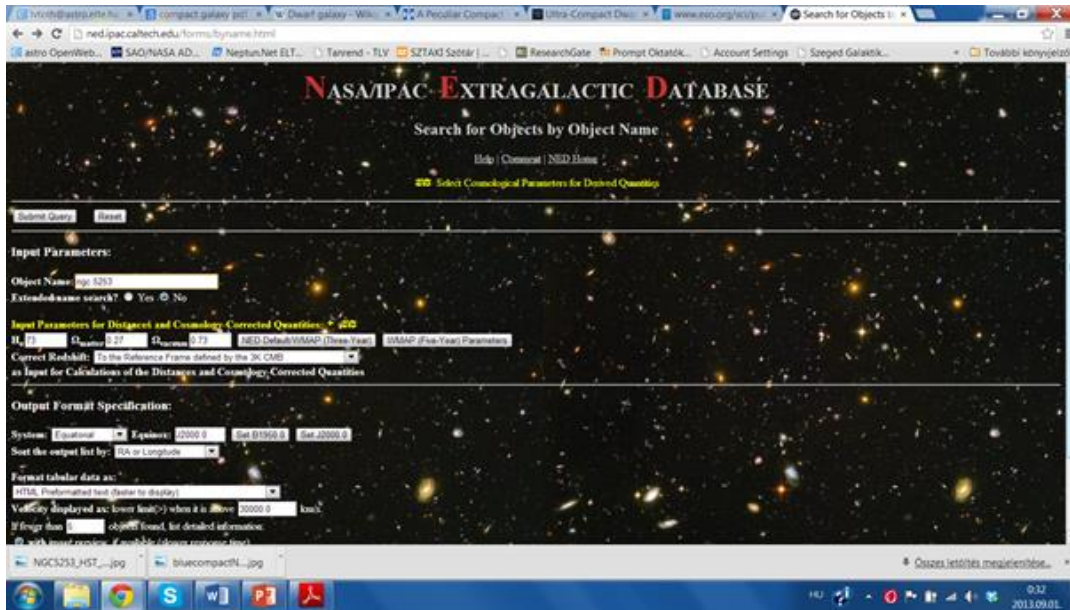
7.1.1. NED

Az NED (NASA Extragalactic Database, <http://ned.ipac.caltech.edu/>) egy komplex adatbázis, mely részben a SIMBAD bibliografikus adatbázishoz hasonlítható, de túlmutat azon. Az extragalaktikus objektumok koordinátái és alap adatain túl képeket, spektrumokat és a felsorolt mérések referenciáit is tartalmazza. A referenciák összefoglalóit és a teljes cikkek fellelhetőségét is megtaláljuk. Emellett gyűjtik, és teljes terjedelmében közreadják a témakörben írt legfontosabb általános és statisztikai publikációkat. A legújabbakat a 'What's New' oldal ajánlja figyelmünkbe. A következő folyóiratokat követik:

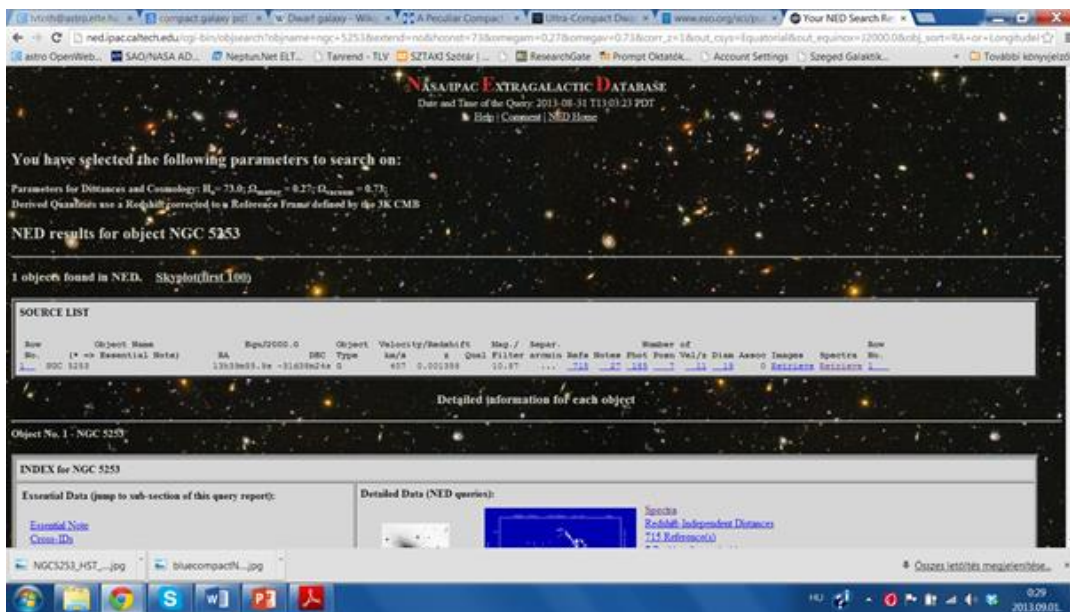
Astronomy and Astrophysics, AJ, ApJ, MNRAS, PASP 1988-óta, az IAU Circular 1991-óta, Publications of the Astronomical Society of Japan, Astronomy Reports, Astronomy Letters 1992-óta (korábban Soviet Astronomy illetve Soviet Astronomy Letters), Astrofizika 1993-óta, Astronomy and Astrophysics Reviews 1994-óta, The Journal of Astronomical Data 1995-óta, és New Astronomy 1996-óta.



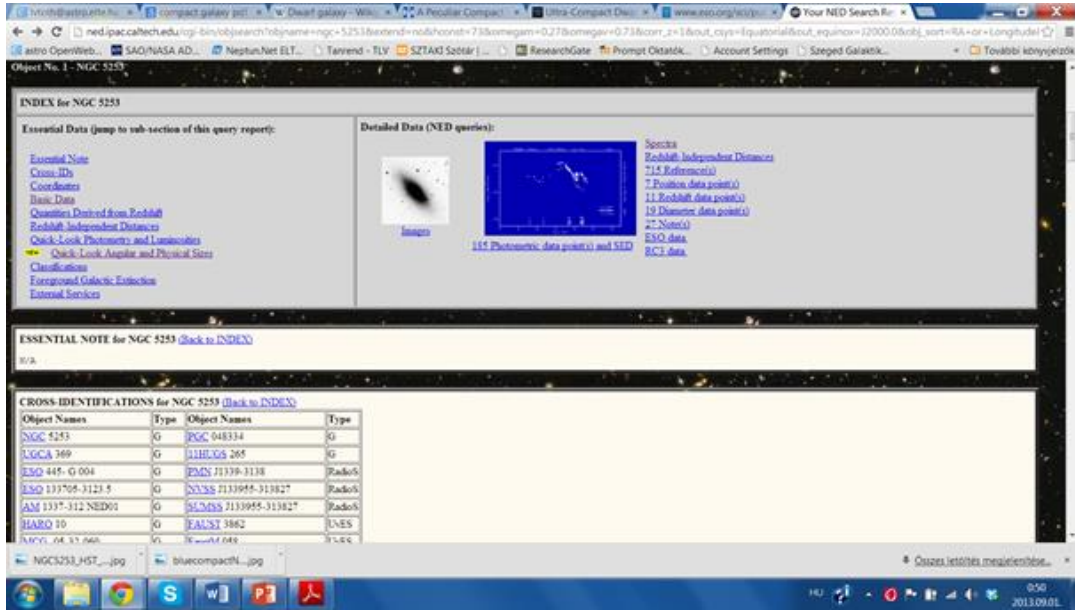
7.1. ábra: A NASA Extragalaktikus Adatbankja, a NED kezdőlapja



7.2. ábra: A NED keresőoldala, egy adott objektum adataihoz ezen keresztül jutunk el.



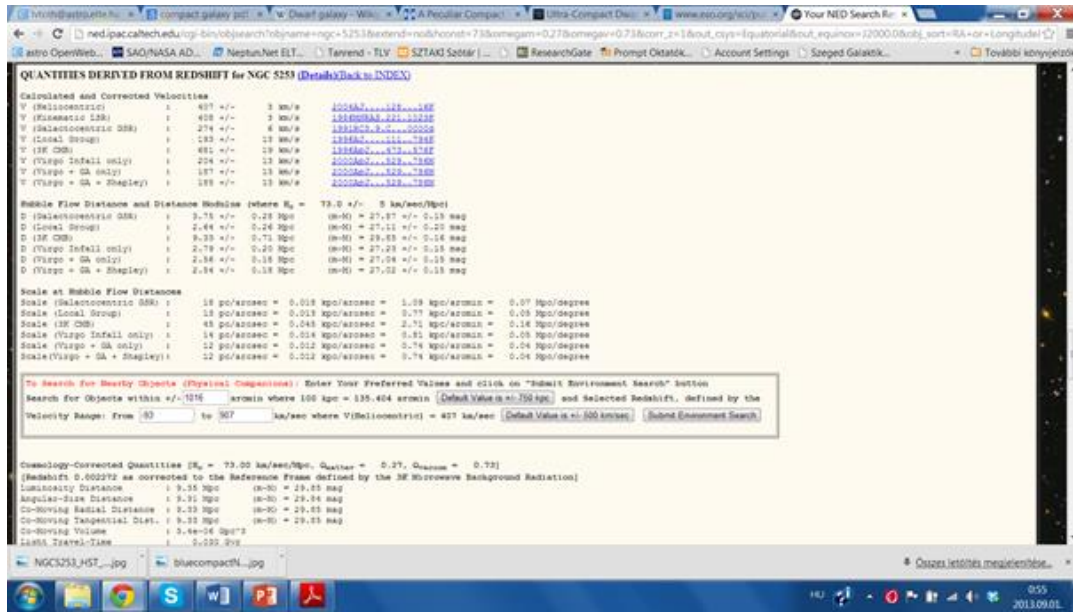
7.3. ábra: A NED az NGC5253 galaxisra rákeresve ide vezet.



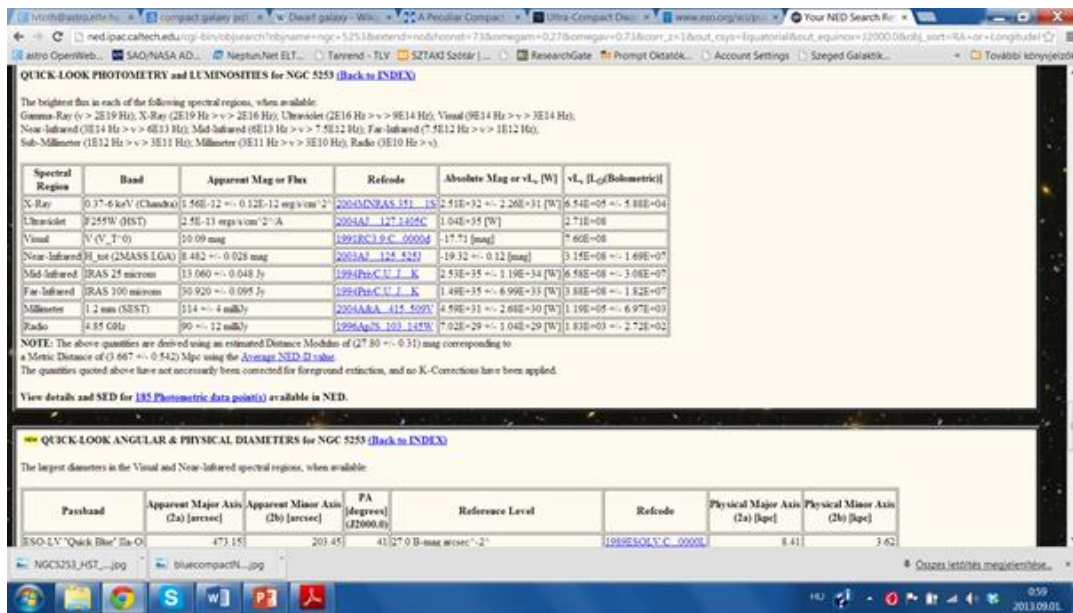
7.4. ábra: Lejjebb görgetve a képmegzőt a rendelkezésre álló fotometriai és spektrális adatokat találjuk, majd a keresett objektum egyéb azonosítóit, koordinátáit, és távolságára eddig publikált értékeket.



7.5. ábra: Még lejjebb görgetve a galaxis típusát, majd a Tejútrendszer csillagközi anyaga által okozott előtér extinkciót olvashatjuk.



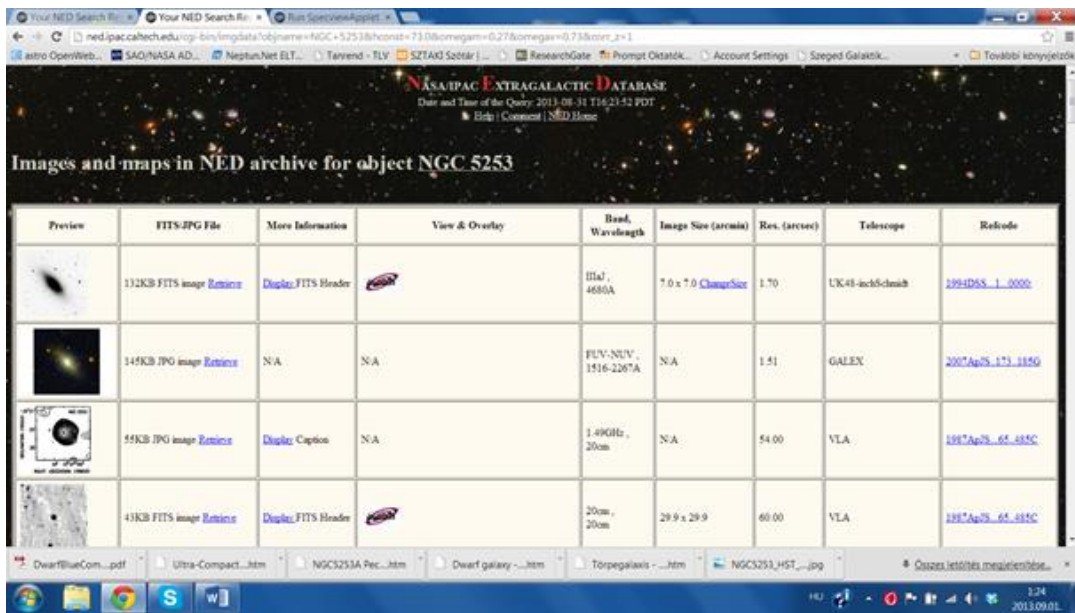
7.6. ábra: Megtaláljuk a vöröseltolódásból számított sebesség adatokat, és a pozíció-sebesség térben az NGC5253-hoz közeli objektumokat kereshetünk.



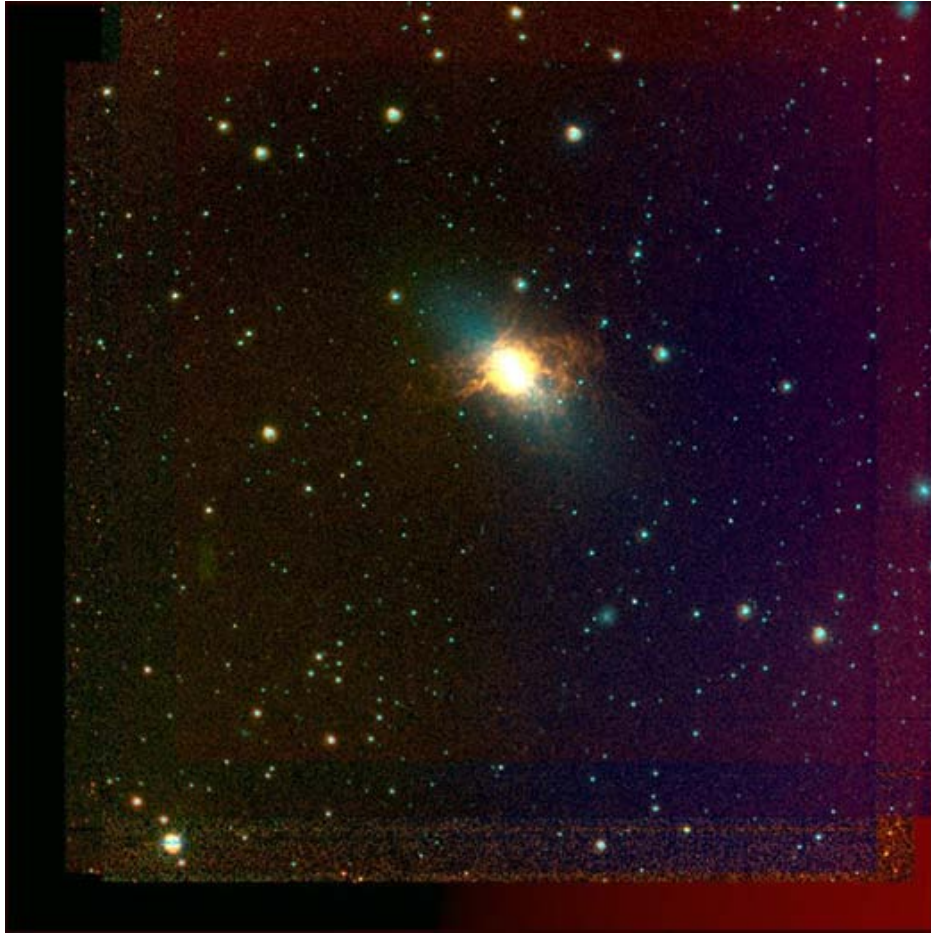
7.7. ábra: Az integrált fotometriai adatok és sugárzási teljesítmény referenciákkal, majd a látszó és lineáris méret következik.



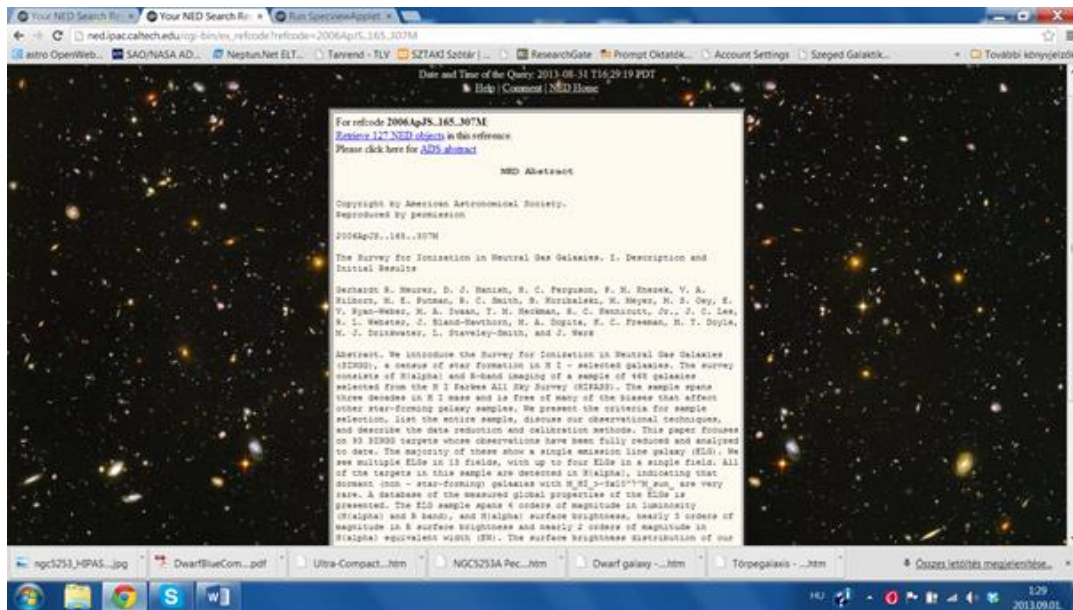
7.8. ábra: Végül a NED-en kívül releváns adatbázisok listáját kapjuk meg, a kapcsok közvetlenül a cél objektumnak az adott külső archívumban fellelhető adataihoz vezetnek.



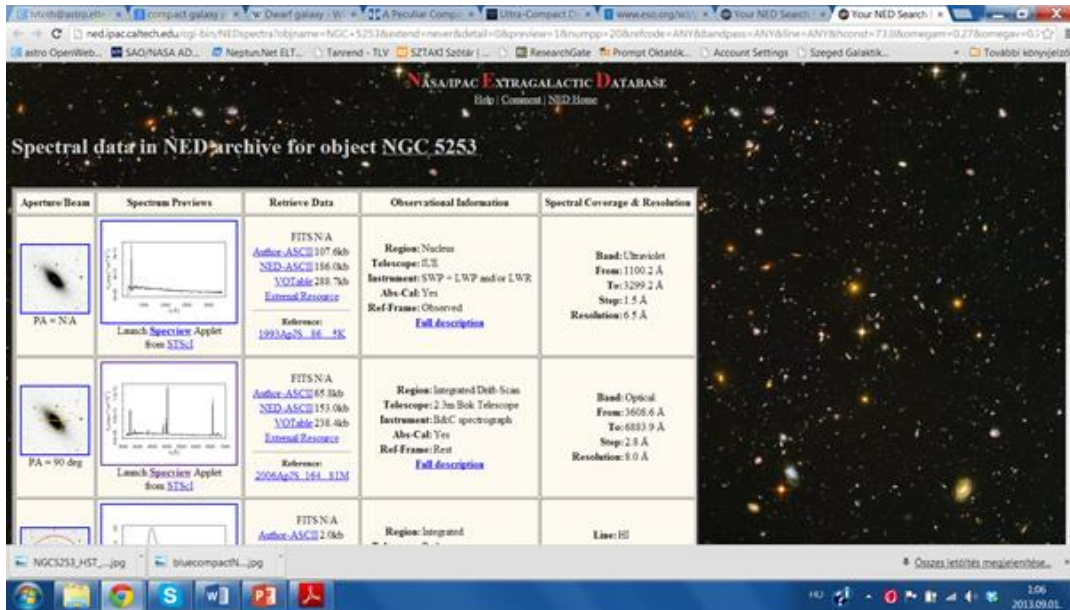
7.9. ábra: Ha az 5.4. ábrán bemutatott képernyőképen az „Images” feliratra kattintunk, az NGC5253-ról készített képi adatokhoz jutunk hozzá minden elérhető (az adatbázisba feltöltött) hullámhosszon.



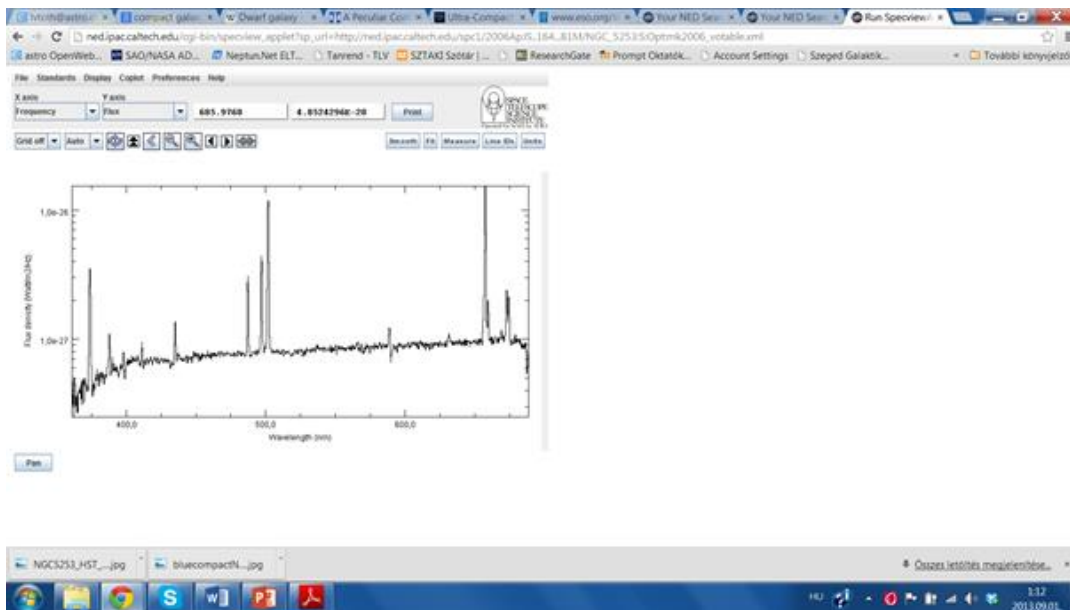
7.10. ábra: Az NGC5253 háromszín kompozit képe. Az egyes színek: vörös = $H\alpha$, zöld=keskenysávú a kontinuum levonása nélkül, kék= R sávú kép (Meuer et al. 2006, Fig. 8.72), ahogyan az NED-ből letölthető. A képen észak felfelé, kelet balra.



7.11. ábra: Az adatokat közlő publikáció bibliografikus adatára kattintva megkapjuk annak rövid összefoglalóját, illetve az ADS-re vezető kapcsolót.



7.12. ábra: Ha a 7.4. ábrán bemutatott képernyőképen a „Spectra” felírra kattintunk, az NGC5253 spektrális méréseihez vezet. Ezeket grafikus formában feldolgozva is letölthetjük, vagy magunk is készíthetünk ábrákat, ha a „Launch Specview Applet” felírra kattintunk.



7.13. ábra: Az NED spektrum elemző java alkalmazása a Specview Applet. Az NGC5253 feldolgozott látható tartományban készített spektrumát az 5.2. ábrán láthatjuk.

A NED-ben elérhető alapadatok:

- részletes fotometria
- morfológiai osztály
- pozíció és átmérő
- vöröseltolódás és radiális sebesség
- nem vöröseltolódásból számított távolságok

A képeket apró ikonnal és a mérésre vonatkozó tájékoztató adatokkal táblázatba rendezve találjuk. Ezek között tipikusan Digitized Sky Survey (DSS), korábbi fotografikus felvételek, 2MASS közeli infravörös képek.

A spektrumokat több spektrális tartományban (látható, infravörös, rádió) grafikus formában előre elkészítve is megtaláljuk, de egy NED spektrum megjelenítő alkalmazás segítségével magunk által szerkesztve is ábrázolhatjuk. Lásd később.

A tárolt és több módon kereshető bibliografikus adatbázisban megtalálhatók a Csillagászati Unió Közleményei (IAU Circulars), extragalaktikus témájú doktori disszertációk összefoglalói.

7.1.2. Az NED használata - keresés

Az NED adatbázisban objektumokat a következő adataik szerint kereshetjük:

- elnevezés
- az elnevezés részlete
- égi pozíció környezete
- valamely paramétere
- morfológiai típus
- referencia kód

Az irodalmat a következők szerint kereshetjük:

- az objektum neve
- szerző(k)
- szövegben előforduló kifejezés

7.1.3. Hasznos eszközök az NED-ben

Az adatbázis mellett szoftver eszközök is segítik az NED felhasználóit:

- átszámítás koordináta-rendszerek között és extinkció becslés (Coordinate & Extinction Calculator)
- sebesség számítás (Velocity Calculator)
- nem NED kozmológiai és extinkció számító eszközök (External Cosmology and Extinction Calculators)
- égbolt-részlet megjelenítő (SkyPlot)
- kép koordináták transzformációjához (X/Y Offset to RA/Dec Converter)
- lexikon (Glossary & Lexicon)
- hasznos honlapok (Web Links)
- gyakran ismételt kérdések válaszokkal az NED szolgáltatásairól (Frequently Asked Questions FAQ)

7.1.3.1. A koordináta átszámoló (Coordinate and Extinction Calculator)

Az NED koordináta és extinkció számító segédlete (**Coordinate and Extinction Calculator**) átszámol egyenlítői és galaktikus koordináta rendszerek között, precessziót számít és pozíció szöveget is átszámol. Ezen túl az extragalaktikus méréseknél előtérként megjelenő galaktikus extinkciót is megadja. Ehhez a Schlafly & Finkbeiner

(2011)által újrakalibrált „SFD98” (Schlegel, Finkbeiner & Davis 1998) extinkciós térképeket használja. Az eredeti SFD98 extinkció értékeket is megadja. A koordináta átszámolásakor a mérés epocháját is figyelembe veszi. Alapéltermezésben az FK4 és FK5-ös rendszerek között számít át. A legutóbbi elfogadott referencia rendszer a kompakt rádióforrások VLBI mérésein alapuló ICRS (International Celestial Reference System) eléggé közeli az FK5-höz.

7.1.3.2. Az NED's sebesség konverzió számító (Velocity Calculator)

Az extragalaktikus objektumok publikált vöröseltolódásai heliocentrikus rendszerben értendők, azaz a mért sebességből a Föld forgó és keringő mozgását levonva korrigáltak. A Velocity Calculator-ral a Galaktikus forgásra és a Tejútrendszer pekuliáris mozgására (a Lokális Galaxiscsoportban) is korrigálhatunk, sőt még a kozmikus eredetű mikrohullámú háttérsugárzás rendszeréhez képest végzett mozgásra is. Előre definiált, vagy saját apex vektorokat is használhatunk.

7.1.3.3. További kozmológiai és extinkció számítási lehetőségek

Öt külső honlapon kozmológiai paramétereket számíthatunk „Cosmology Calculators”. Öt külső oldalon 5 fok galaktikus szélesség felett számos módszerrel határozhatjuk meg a galaktikus extinkciót (Extinction Calculators).

7.1.3.4. A NED kép-égi koordináta transzformáció (Rectangular-to-Equatorial Coordinate Converter)

Tetszőleges derékszögű koordinátarendszerben megadott pozíciót egyenlítő koordinátákra számít át az NED X/Y Offset to RA/Dec Converter, ha a képen van referencia koordinátánk, vagy az NED-ben nyilvántartott objektum.

7.2. Atlaszok

7.2.1. A Hubble Atlasz

Hubble eredeti galaxis osztályozási elvét Allan Sandage fotografikus megfigyelésekre és morfológiai elemzésre alapozva pontosította. A Hubble Atlasz a Hubble-Sandage klasszifikáció illusztrációja (Sandage 1961).

7.2.2. Van Den Bergh törpegalaxis katalógusa

Sidney van den Bergh (1959) több száz törpegalaxist foglalt katalógusba a Palomar felmérés égboltfelvételeiről készült nyomatokat átvizsgálva. Az összes 1 ívpercnél nagyobb átmérőjű objektumot megvizsgálta $\delta > 23^\circ$ deklináció felett. Két egyszerű kritériummal választotta ki a törpegalaxisokat (több mint 200-at):

- alacsony felületi fényesség
- nincs, vagy kicsi középponti fényesség koncentráció a vörös képeken
- A következő alapvető típusokat azonosította:
- törpe irreguláris (D_{Ir}, dwarf irregulars) – a Lokális Csoport két galaxisa az NGC 6822, vagy IC 1613-hoz hasonlóak
- törpe spirális (D_{Sp}, dwarf spirals) – spirálkar darabokra emlékeztető elnyúlt fényes foltok, és/vagy küllő jelenlétével
- Törpe elliptikus (D_{El}, dwarf ellipticals) – az óriás elliptikusoktól nehezen elkülöníthetőek, ezért kevés ilyen van a katalógusban
- törpe sferoidális (D_{Sph}, dwarf spheroidal) – nagyon alacsony felületi fényességű szabályos alakú galaxisok

7.2.3. Az Arp-féle *Különleges galaxisok atlasza*

A *Különleges galaxisok atlasza* (Atlas of Peculiar Galaxies) katalógust 1966-ban adta ki Halton Arp. A különlegesség a morfológiai osztálytól való eltérést jelentette, és nem a jelenség fizikai leírása révén, csak a megjelenésből eredően kerültek a katalógusba az objektumok. A vizsgálatokat a Mt. Wilson és Palomar Observatory fotografikus archívuma fotólemezein végezte. A földrajzi hely miatt felmérése lényegében az északi égboltra korlátozódott, az objektumoknak csak mintegy 1/5-e déli. A katalógusban szereplő 338 objektumról 3 táblázatba összegezte a fontosabb adatokat és az elérhető egyéb mérések adatait. Az elsőben az égitestek azonosításához szükséges, a fotók elkészítésének körülményeivel kapcsolatos információk, és a különlegesség osztályozása található. A második táblázat az objektumok radiális sebessége, a harmadikban pedig az esetleges rádiósugárzásuk jellemzése, illetve a közelükben talált rádióforrások adatai szerepelnek.

Arp elsősorban a Hubble-féle fő típusok köré fonta különlegességi alosztályait. A különleges spirál rendszerekre 11 kategóriában 101 példát ad, és 5 kategóriában 44 példát mutat be különleges elliptikus galaxisokra. Ez összesen 145 csillagrendszer. További 14 kategóriában nem spirális, vagy elliptikusnak tűnő egyedülálló galaxisokat találunk, összesen 123 példával. További 8 csoportban 76 olyan kettős és többes rendszer van, melyeket Arp valamiért nem sorolt be a spirális és elliptikus galaxis kategóriákba, és van még egy „egyéb” csoport 6 példával.

Pekuliárisnak minősült egy galaxis, ha például az alább felsorolt feltételek valamelyike teljesült rá.

Különleges morfológiai sajátosságok spirálgalaxisokra: egyetlen kar, integráljelhez hasonló alak, három kar, felhasadt kar, rendellenes fényességeloszlás, a karok végén kísérő(k).



7. 14. ábra: A Bálna-galaxis (Arp 281) egy éléről látszó spirálgalaxis törpe elliptikus kísérővel. (Anttila, S. 2007, <http://hu.wikipedia.org/wiki/Fájl:Whalegalaxy.jpg>)

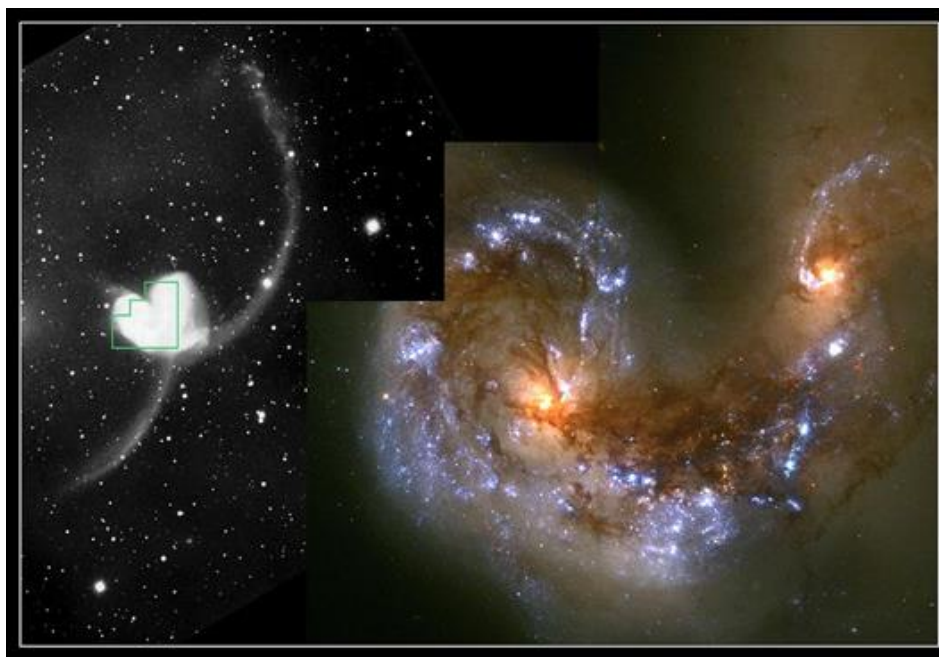
Különleges morfológiai sajátosságok spirálgalaxisokra: közelében anyagfoszlányok, spirálgalaxis közvetlen közelében helyezkedik el, közeli spirálgalaxissal láthatóan kölcsönhatásban lévő – azt deformáló

Egyéb pekuliaritások: gyűrű, hurkok, anyagkilövellés (jet), magból kidobott anyagfelhő, amorf karok, összeolvadás vagy beolvadás, szoros galaxiscsoportok, galaxisláncok.

Az NGC 6946 spirálgalaxist (lásd 7.15. ábra) és a Csápok galaxist (lásd 7.15. ábra) William Herschel fedezte fel. Az Arp által összeállított Különleges galaxisok atlaszában ezek a 29-es szám, és a 244-es szám alatt szerepelnek.



7. 15. ábra: Az NGC 6946 spirálgalaxis a Cepheus csillagképben, közel a Cygnus csillagképhez. Az Arp által összeállított Különleges galaxisok atlaszában a 29-es szám alatt szerepel (http://hu.wikipedia.org/wiki/F%C3%A1jl:SpiralGalaxy_NGC6946.jpg).



7. 16. ábra: A Csápok galaxis (Arp244), avagy az NGC 4038 és 4039 galaxisok összeolvadása. Jobb oldalon kompozit kép a HST Wide Field Planetary Camera 2 négy különböző filterrel készült felvételeiből (Whitmore, STScI and NASA, 1997)

7.2.4. A Morgan-féle formatípusok:

W. Morgan, a 1970-ben megjelent klasszifikációjában már a kvazárokat is a kompakt objektumok közé sorolja.

Fő típusok:

Q: Csillagnak tűnő objektumok melyek spektrumában nagy vöröseltolódás észlelhető.

N: Olyan galaxis, melynél a látszólag kis mag aránytalanul fényes, a luminozitás jelentős hányadát ez teszi ki. Körülötte felismerhetők az objektum halványabb részei is. (pl. NGC 5548, 3C 48)

C: Kis szögátmérőjű, nagy felületi fényességű galaxisok. Nehezen különböztethetők meg a csillagoktól. Struktúra nélküli, kék, kompakt objektumok. (pl. NGC 3516)

Alosztályok:

N-: kevésbé markáns N típusú galaxisok. (pl. NGC 4051)

NS: Olyan N típusú galaxisok, amelyeknek szépen kirajzolódó spirálkarjuk van. (pl. Markarian 10)

Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:

NED-et bemutató kiadvány: „<http://ned.ipac.caltech.edu/docs/NED2013JanBrochure.pdf>”

Jarrett, T.H.: *Near-Infrared Galaxy Morphology Atlas*, <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/gallery/galmorph/>

Meurer, G. et al, 2006: „*The Survey for Ionization in Neutral Gas Galaxies. I. Description and Initial Results*”, *ApJS*, 165:307

Sandage, A., 1961: „*The Hubble Atlas of Galaxies*”, Carnegie Institution of Washington
http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Shapley_Ames/frames.html

Schlafly & Finkbeiner 2011: *ApJ* 737, 103

Schlegel, Finkbeiner & Davis 1998, (SFD98): *ApJ* 500, 525

8. fejezet - A galaxisok állapotjelzői és meghatározásuk

8.1. A galaxisok fotometriai és spektrális tulajdonságai

8.1.1. Felületi fényesség

8.1.1.1. A felületi fényesség definíciója

Az I_ν monokromatikus felületi fényességet, avagy monokromatikus intenzitást a következőképpen definiáljuk:

$$I_\nu = \frac{L_\nu}{\text{felület} \cdot \Omega} = \frac{\text{fluxus} \cdot \text{felület}}{\text{felület} \cdot \text{térshög}} = \frac{F_\nu}{\Omega} \quad (8.1)$$

ahol L_ν a ν frekvencián leadott sugárzási teljesítmény, F_ν a monokromatikus fluxus, Ω pedig a térshög. A monokromatikus felületi fényesség mértékegysége a $\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}\text{steradian}^{-1}$, melynek a csillagászatban általában kis törtrészével találkozunk, ezért SI egység a jansky (Jy) is:

$$1\text{Jy} = \frac{10^{-26}\text{W}}{\text{m}^2\text{Hz}} = \frac{10^{-23}\text{ergs}}{\text{cm}^2\text{Hz}} \quad (8.2)$$

Ugyanakkor a galaxisok felületi fényességére használhatjuk a $L_{\odot\text{pc}^{-2}}$ egységet is. Az optikai fotometriában a felületi fényesség mérésére a magnitúdó/négyzetívmasodperc mértékegység használatos, erre a következő jelölést használjuk: mag/\square'' . A μ felületi fényesség az m látszó magnitúdó és az Ω'' négyzet-ívmasodpercben megadott apertúrával:

$$\mu_z = m_z + 2,5 \log \Omega'' = -2,5 I_z(x) + c_z \quad c_F = 26,4 \text{mag}/\square'' \text{ , ami } 1L_{N\Phi Y\text{PC}^{-2}} \text{ értéknek felel meg} \quad (8.3)$$

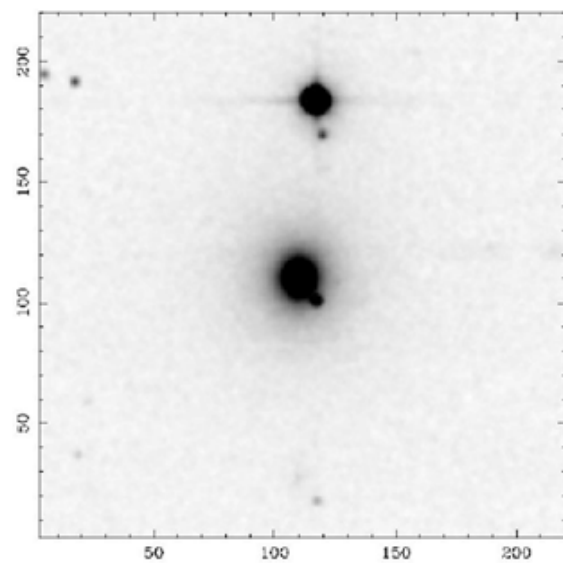
A felületi fényesség eloszlását kontúrtérképeken is megjelenítik, az azonos felületi fényességű pozíciókat összekötő kontúrvonal elnevezése: *izofóta*.

8.1.1.2. A felületi fényesség eloszlása mérésének lépései

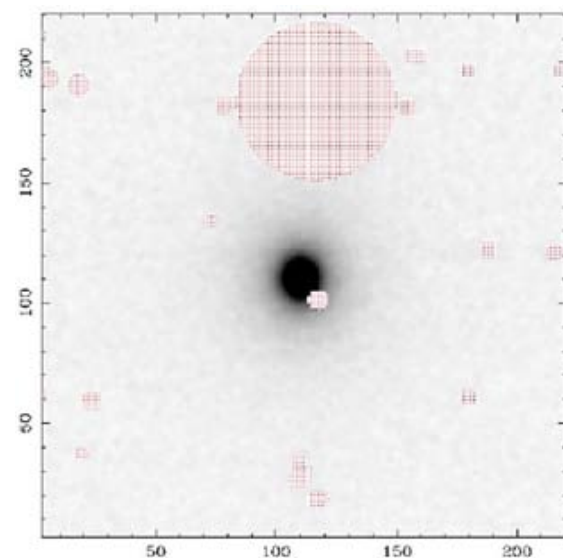
A galaxis általában, mint kiterjedt forrás jelenik meg a fotometriai mérés eredményében. A galaxisról készített kalibrált kép feldolgozásakor a következő lépéseket tesszük:

- Pontforrásokat azonosítunk, melyek nem a galaxis részei.
- Az elméleti, vagy tapasztalati pontforrás leképezési függvény (point spread function, PSF) alkalmazásával levonjuk ezen pontforrások járulékát a képről.
- Az izofótákat megrajzoljuk, és ezekhez ellipsziseket illesztünk.

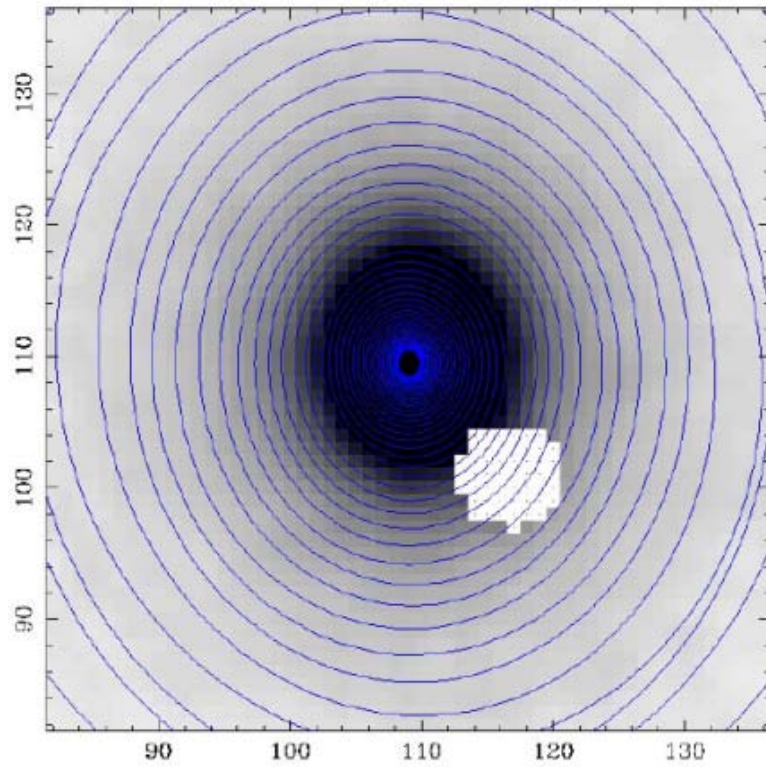
A 8.1. ábrán ezeket mutatjuk be az NGC3193 galaxisra az ARCHANGEL galaxis fotometriai szoftver rendszert alkalmazva. Az ARCHANGEL egy UNIX alapú szoftvercsomag galaxisok felületi fényesség fotometriájának elemzésére (Schombert 2007, 2011). Magába foglalja az égi háttér meghatározását, a kép tisztítását (frame cleaning, azaz csillagok levonása), ellipszis illesztést, fényesség-eloszlás profil illesztését, teljes és adott izofótán belüli fényesség meghatározását.



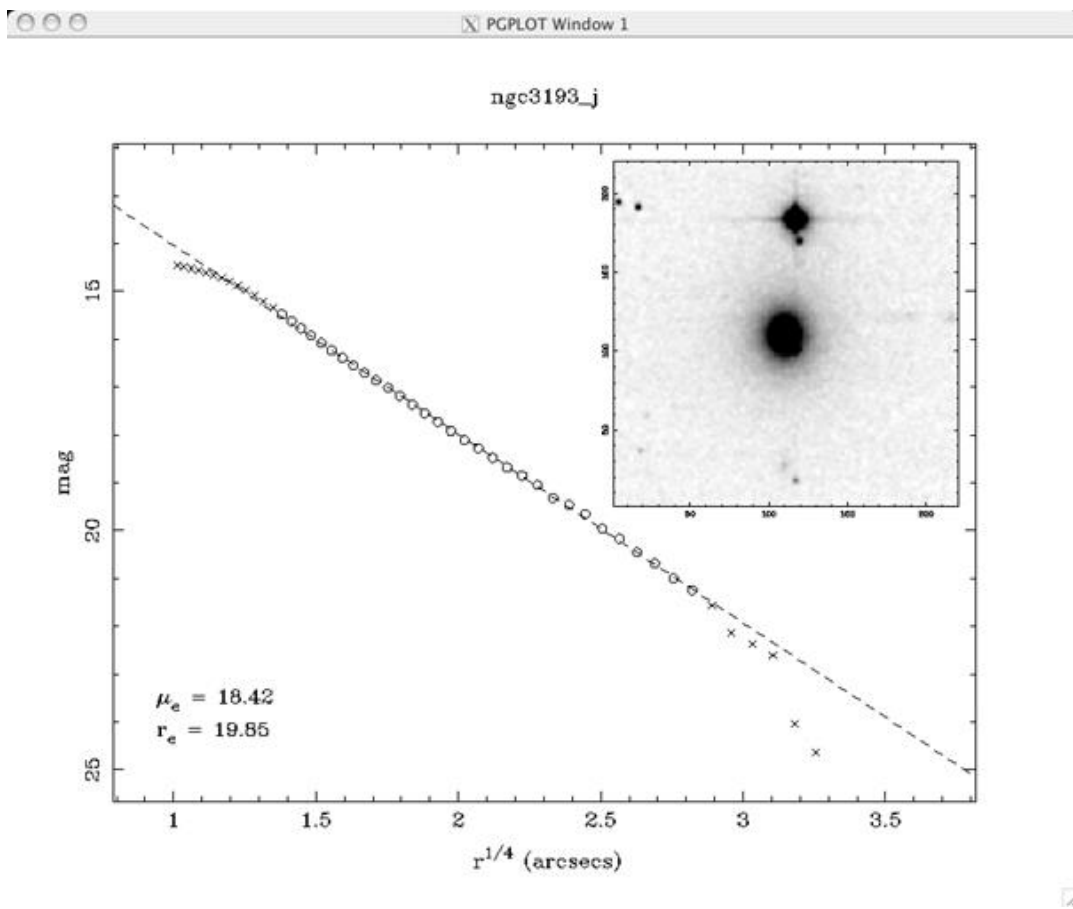
8.1.a ábra: Az NGC3193 elliptikus galaxis CCD felvétele (Schombert 2007).



8.1.b ábra: Az NGC3193 galaxis CCD felvétele a csillagokat kimaszkolta az algoritmus (Schombert 2007).



8.1.c ábra: Az NGC3193 galaxis CCD felvétele izofóttákkal (Schombert 2007).



8.1.d ábra: Az NGC3193 galaxis de Vaucouleurs profilja az ARCHANGEL szoftverrel (Schombert 2007). A μ_e effektív fényesség és az ehhez tartozó r_e effektív sugár az ábra bal alsó sarkában olvasható (Schombert 2011).

8.1.1.3. A Sersic-profil

Az $I(r)$ felületi fényesség radiális eloszlására egy általánosított függvényt vezetett be Jose Luis Sersic tapasztalati úton, ez az úgynevezett *Sersic profil* (Sersic 1963):

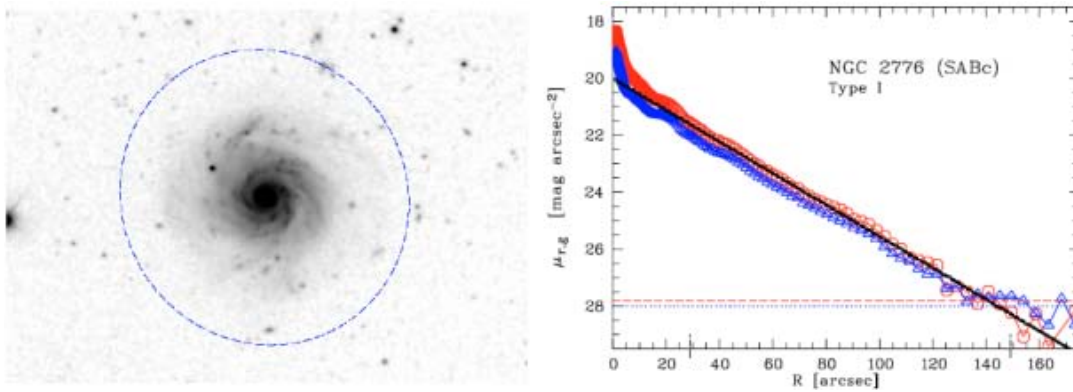
$$I(r) = I_0 \exp\left(-\left(\frac{r}{r_h}\right)^{1/n}\right) \quad (8.4)$$

Ahol $I(r)$ az r sugárnál vett intenzitás; I_0 a középponti intenzitás; r_h a skálamagasság; n pedig az úgynevezett Sersic index, vagy alak-paraméter. A Sersic-index speciális értékeinél ismert görbéket kapunk: $n=1$ exponenciális, $n=0,5$ Gauss görbe. Az elliptikus galaxisokra: $1,5 < n < 20$; bulge-okra $1,5 < n < 10$, küllőre $n \approx 0,5$; korongokra $n \approx 1$.

A galaxis teljes fluxusa egyik meghatározási módja, hogy a felületi fényesség profil mérése után Sersic-profilfit illesztünk, és abból analitikusan számítjuk a fluxust.

8.1.1.4. A felületi fényesség profil és a galaxis komponensei

Valós esetekben a felületi fényesség profil több komponens kombinációja.



8.2. ábra: Az NGC2776 spirálgalaxis képe az SDSS felmérés r fotometriai sávjaiban (bal), és az r és g sávú felületi fényesség függése a galaktocentrikus sugártól (jobb), az úgynevezett radiális felületi fényesség profil. (Pohlen & Trujillo 2006)

Egy spirálgalaxis fényesség profilja a galaxis alrendszerének megfelelően a központi sferoid (bulge), a korong és a halo profiljainak összege. Ezen belül a korong tovább bontható a vékony és vastag korongra (thin and thick disk). Bár a halo is felbontható egy belső barionikus halóra és a sötét anyag halóra, de értelemszerűen utóbbinak nincs fényesség járuléka. A felületi fényesség profilok az r galaktocentrikus távolság függvényében az r_e effektív sugárral és r_0 skálahosszal:

$$I(r) = I_0 10^{-3.33((r/r_0)^{0.25}-1)} \quad \text{a sferoid fényesség un. } 1/4\text{-es profilja (8.5)}$$

$$I(r) = I_0 10^{-r/r_0} \quad \text{a korong exponenciális felületi fényesség profilja (8.6)}$$

A korong felületi fényesség eloszlása gyakran csak két exponenciális eloszlás lineáris kombinációjaként adható meg, azaz két skálahossz van: $r_{0,thin} < r_{0,thick}$.

8.1.1.5. A fénymérés korlátai – az éjszakai égbolt fényessége

Az éjszakai égbolt természetesen nem sötét, hiszen számos földi és földön kívüli fényforrás fényével „szennyezett”. A legfőbb források, melyek az égbolt háttér/előtér fényét adják a látható tartományban:

- airglow: a felső atmoszféra fotokémiai folyamatai produkálják, spektruma szabálytalan és erősen változó időben és a földrajzi szélesség függvényében
- lakott területek fényforrásai: lehet erős emissziós vonalas (Na, Hg) és folytonos spektrum
- állatövi fény: a Naprendszer törmelék porkorongja porszemcséin szóródó fény
- fel nem bontott csillagok fénye
- diffúz extragalaktikus fény: fel nem bontott extragalaktikus forrásoktól ered



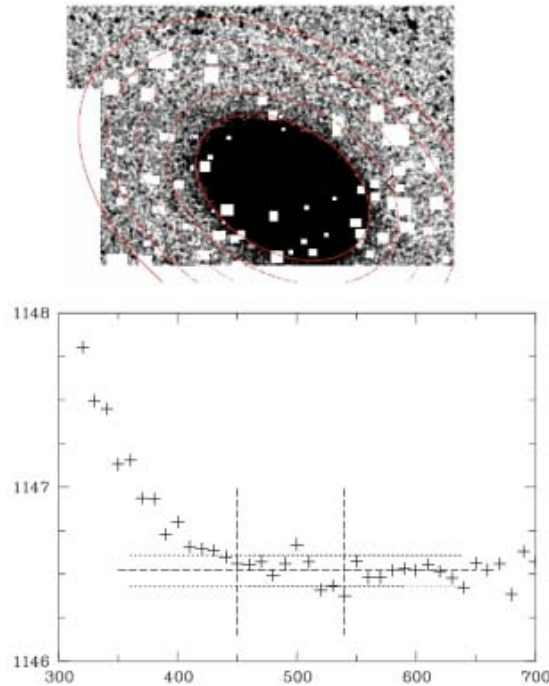
8.3. ábra: Az airglow a Nemzetközi Űrállomás (ISS) fedélzetéről. Az Orion csillagkép egy részét a földi légkör sárgás-zöldes derengése takarja. (Credit: Don Pettit, ISS Expedition 6 Science Officer, NASA)
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/40/Orion1_big.jpg

Az éjszakai égbolt felületi fényessége az U, B, V, R, I fotometriai sávokban egy tipikus holdtalan éjszakán: 22; 22,7; 21,8, 20,9; 19,9 mag/□". Az égbolttól származó felületi fényességet meg kell állapítani és le kell vonni.

8.1.1.6. A fénymérés korlátai – leképezés

Ahogy azt korábban már említettük, a galaxis, mint kiterjedt objektum képére előtér objektumok (elsősorban a Tejútrendszer csillagai) is vetülhetnek, ezeket megfelelő eljárással meg kell találni és le kell vonni a képből. Az eljáráshoz szükség van a teljes optikai rendszer leképezésének ismeretére.

A fotometriai úton megismerhető galaxis minta természetesen megfigyelési korlátokkal terhelt, nem elfogulatlan. A nagyon alacsony felületi fényességű galaxisokat nem fogjuk látni az égi háttér fluktuációjától. A nagyon kis látszó átmérőjű galaxisokat nem tudjuk megkülönböztetni a csillagoktól. Ezt *luminosity and surface brightness bias*-nak hívják.



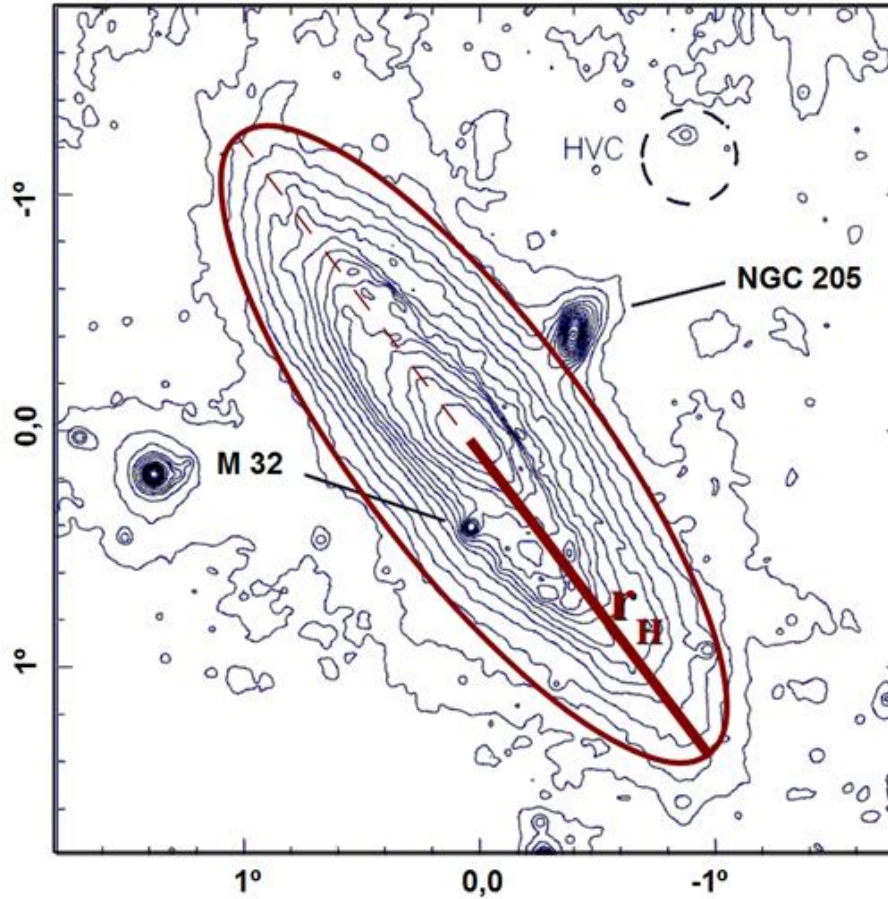
8.4. ábra: A felső képen az NGC5300 galaxis „csillagtalanított” (fehér téglalapok a csillagok helyén) felületi fényességét a galaxis középpontja körüli koncentrikus ellipszis-gyűrűkben határozzuk meg. Az alsó ábrán ezen gyűrűkben mért átlagos felületi fényességet (önkéntes egységben) látjuk a gyűrű átmérőjének függvényében. A függőleges szakaszok közti részen meghatározható a galaxis körüli átlagos égboltfényesség (szaggatott vonal) és ennek szórása.

8.1.2. A Holmberg sugár

A galaxisok fotografikus fotometriáját 27 magnitúdó/négyzetívmásodperc felületi fényesség értékig tudták elvégezni. Eric Bertil Holmberg a galaxisok mérete meghatározására a μ_H izofótát vezette be (Holmberg 1958) ahol:

$$\mu_H = 26,5 \text{ mag/arcsec}^2 \quad (8.7)$$

A galaxis méretét megadó *Holmberg sugár* (Holmberg radius) a μ_H izofótához illesztett ellipszis fél nagytengelyének hosszával egyenlő. Az úgynevezett *standard sugár* (standard radius) a 25 mag/arcsec^2 izofótához illesztett ellipszis fél nagytengelye.



8.5. ábra: Az Andromeda galaxis és (Ferguson et al. 2002 alapján) A 75 perces expozíciót Sydney van den Bergh készítette 1970-ben a Palomar Schmidt távcsővel IIIaJ fotólemeze. A legalacsonyabb kontúr $B = 27$ magarcsec⁻². Az NGC 205 és M32 és egy nagy sebességű HI felhő (HVC, Davies 1975) helyét is megjelöltük.

8.1.3. Galaxisok látszó fényessége

Egy kiterjedt objektum teljes, vagy *integrális fényességét* (*total magnitude*) a luminozitásnak az objektumnak megfelelő felületen történő felösszegzéséből határozhatjuk meg. A mérés praktikusán egy fotometria a megfelelő apertúra alkalmazásával. Az első átfogó fotometriai felmérést Gerard de Vaucouleurs és munkatársai adták közre (1964), melyet RC1-ként (Reference Catalogue) is emlegetnek. Az RC1-ben a Johnson-féle B sávban (lásd Függelék) átlagos felületi fényességet és integrált fényességet valamint B-V színindexet is találunk. A legnagyobb felületi fényességű az NGC 5846 óriás elliptikus galaxis a 11,06 mag/□'' értékkel. A legfényesebb a Nagy Magellán Felhő $B = 1.2$ magnitúdó integrált látszó fényességgel, az RC1 leghalványabb objektuma pedig az NGC 5976 lentikuláris galaxis $B = 16.01$ magnitúdóval. De találunk ennél frissebb adatokat is a Vizier-ben, mint például az ESO-LV katalógus (Lauberts & Valentijn 1989) 16000 déli galaxis adataival.

A galaxis teljes látszó magnitúdója a felületi fényesség integrálásával:

$$m_z = -2,51 \log \int d\phi R dR I(R, \phi) + c_z \quad (8.8)$$

$$m_z = -2,51 \log 2\pi \int R dR I(R) + c_z \quad \text{ha a galaxis körszimmetrikus} \quad (8.9)$$

Általában $a_{\mu_B} = 26 \text{ mag}/\square''$ kontúron belül összegzik a fényességet.

8.1.4. Abszolút fényesség

A galaxisok M_z abszolút fényességét az m_z látszó fényességből a csillagokéval azonos módon kapjuk a μ_z távolsági modulus felhasználásával.

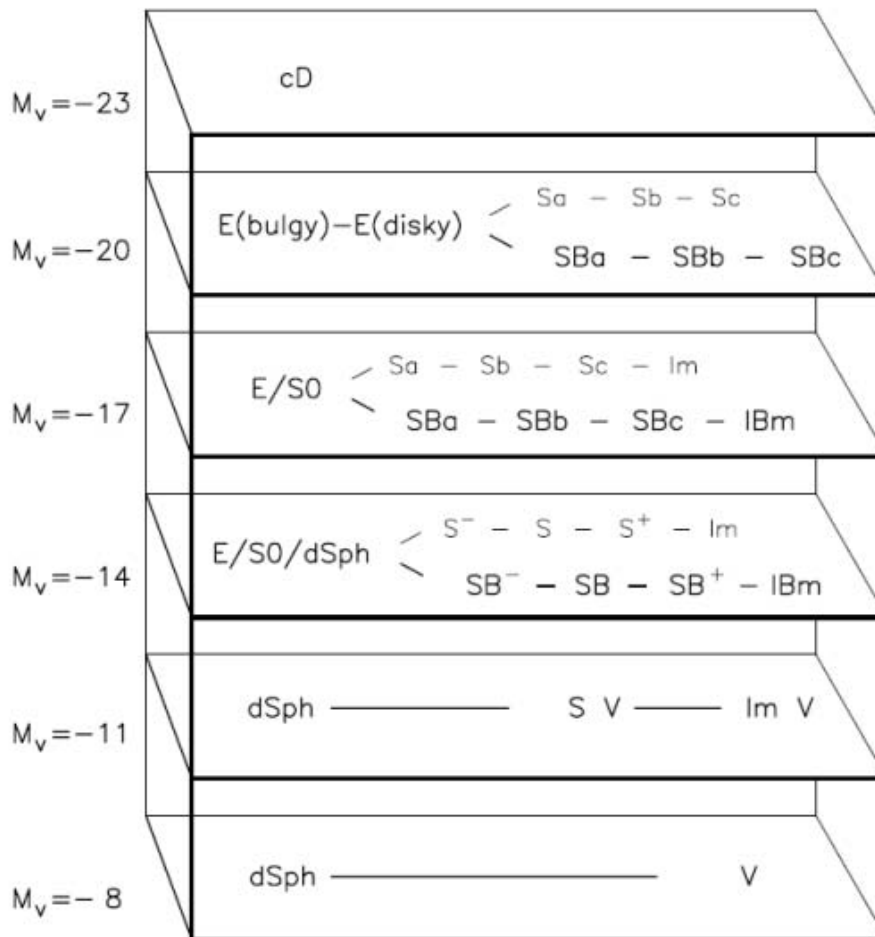
$$M_z = m_z - \mu_z \tag{8.10}$$

$$\mu_z = m_z - M_z = -5 + 5 \log(d) + A \tag{8.11}$$

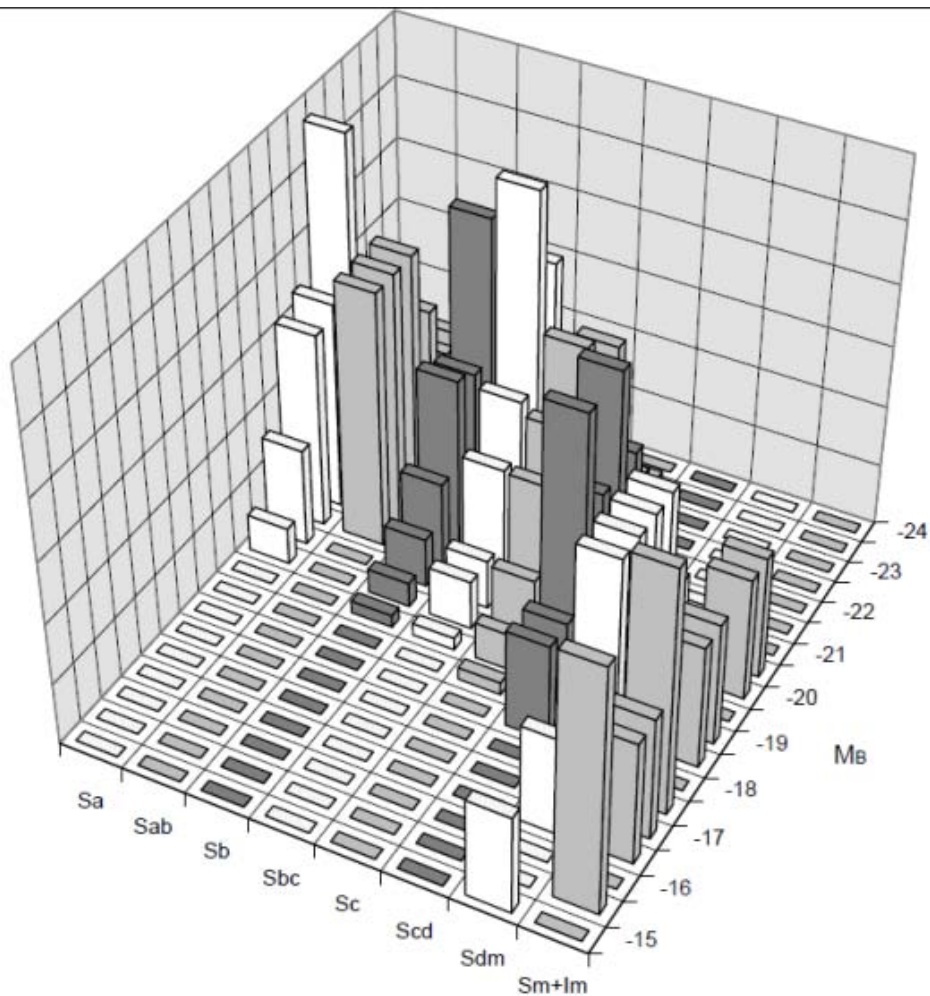
$$L_V(\text{galaxis}) / L_V(\text{Nap}) = 10^{(V_{\infty} - M_V) 2.5} = 10^{(4.83 - M_V) 2.5} \quad V_{\text{Nap}} = 4,83 \text{ magnitúdó felhasználásával.} \tag{8.12}$$

Hasonlóan köthetjük a galaxisok B (kék), és K (közei infravörös) abszolút fényességét is luminozitásukhoz a Nap B és K sávú abszolút fényességének felhasználásával ($B_{\text{Nap}} = +5.48$, $K_{\text{Nap}} = +3.28$).

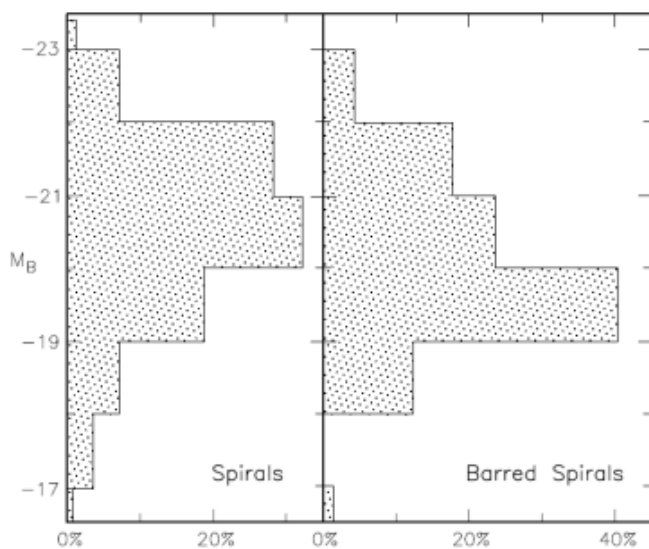
8.1.5. A galaxis fényességének és morfológiai osztályának kapcsolata



8.6. ábra: Morfológiai osztályok és abszolút magnitúdó, egy lehetséges „3D hangvilla” (van den Berg, <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/9703164.pdf>)



8.7. ábra: Morfológiai osztályok és luminozitás szerinti gyakoriságuk. Jól látható, hogy az Sd-Sm-Im objektumok átlagosan lényegesen kisebb luminozitásúak, mint az Sa-Sb-Sc spirálgalaxisok.



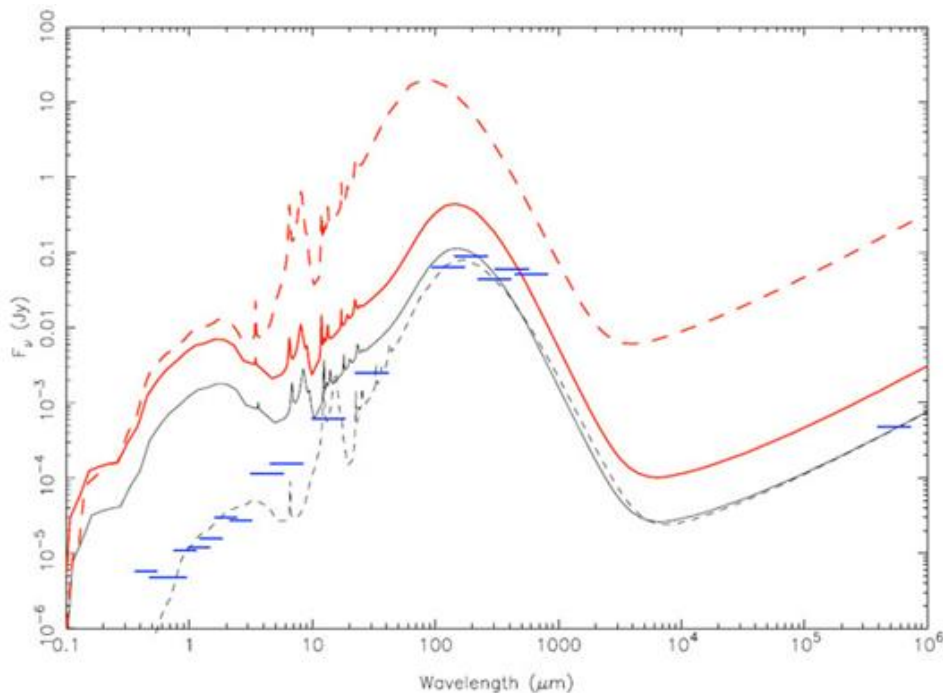
8.8. ábra: Normál és küllős spirálgalaxisok luminozitás szerinti gyakorisága a Shapley-Ames Katalógusban (van den Bergh, <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/9703164.pdf>)

8.1.6. Spektrális energia-eloszlás

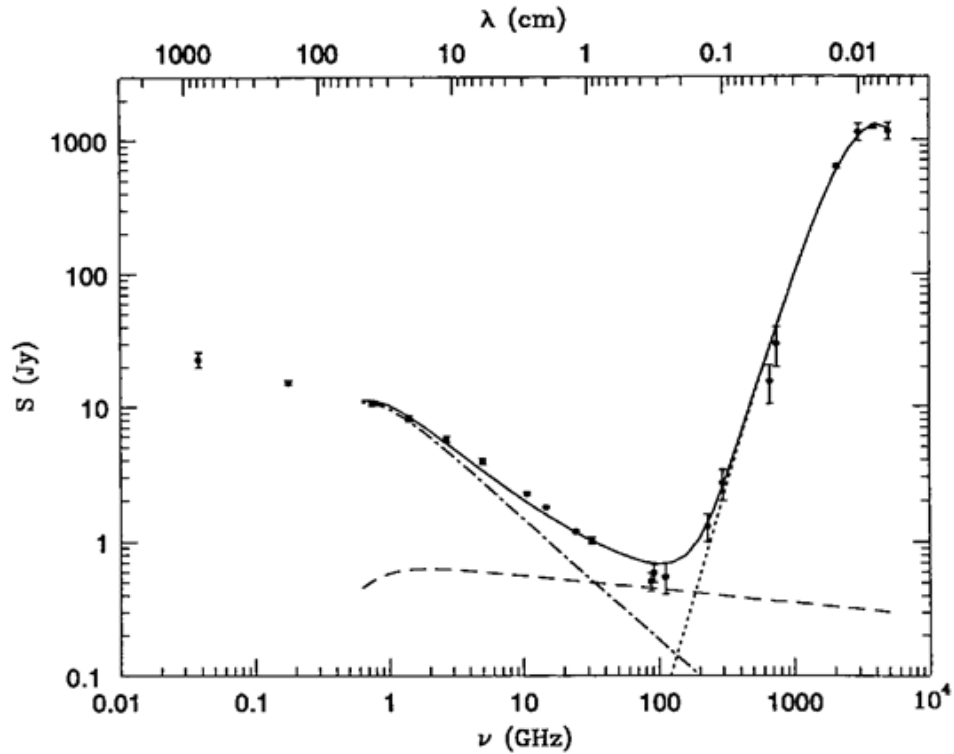
A *spektrális energia-eloszlás diagram* (*spectral energy distribution*, SED) a hullámhossz függvényében ábrázolja a monokromatikus fluxust. A SED-et továbbiakban vörösödésre korrigálva vizsgáljuk. SED készülhet közepes spektrális felbontású spektrumok egyesítéséből, ekkor az erősebb vonalakat és sávokat is látjuk rajta. Ezek befolyásolhatják egy-egy adott sávban a fotometriát is. SED-en alapvetően a spektrum kontinuumát értjük. A szakirodalomban általában az ultraibolyától az infravörös, vagy a rádió tartományig terjedő SED-eket találunk, bár egyre több a röntgen mérési adat, és a röntgen sugárzást is mutató ismert galaxis. Az ultraibolya sugárzás elsősorban a fiatal nagytömegű csillagoktól és ionizált gázfelhőkből ered, melyek az aktív csillagkeletkezést jelzik. Ugyanezek hozzájárulása jelentős a látható és infravörös fluxushoz is. Utóbbi elsősorban a por által elnyelt és visszasugárzott rövidebb hullámhosszú sugárzás. A csillagközi anyagban szegény galaxisok ultraibolya és távoli infravörös fluxusa kisebb. A rádió tartományban részben termikus, részben nem termikus (például szinkrotron) sugárzást mérhetünk.

A látható-ultraibolya határon a kontinuumban egy feltűnő spektrális jellegzetességet találunk, a 400nm-es levágást, melyet a csillag-atmoszférák fém tartalma okoz. Ez az elliptikus galaxisok spektrumában jól látható. A levágást csökkenti, ha a fémvonalak elnyelő hatását a nagyszámú forró kék csillag sugárzása ellensúlyozza. Az alacsonyabb fém tartalmú, ugyanakkor aktív csillagkeletkezést mutató irreguláris galaxisokban például a 400nm-s levágás nem figyelhető meg. Ez a levágás jól használható a vörösödés becslésére fotometriai mérésekből.

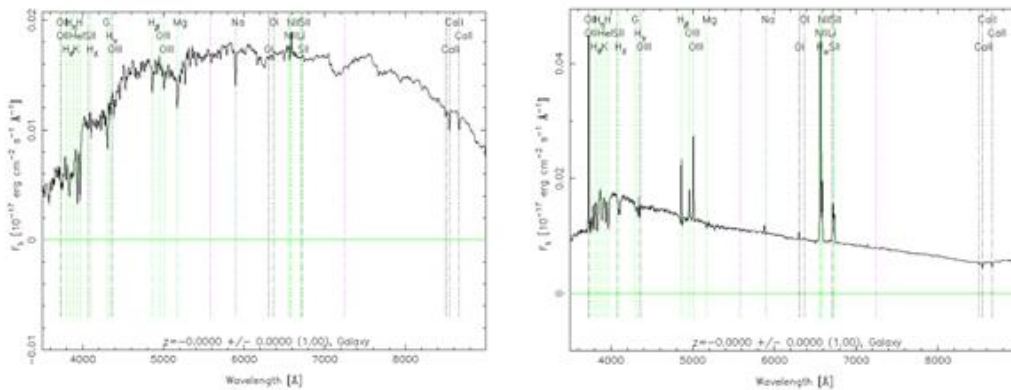
Az elliptikus és lencse galaxisok SED görbéje „lapos” tetejű, a teljes látható tartományban. A normál (Sa, Sb, Sc) spirálgalaxisok SED-je is viszonylag lapos, de a kék tartományban maximuma van. Ez a maximum annál erőteljesebb, minél jelentősebb a csillagkeletkezés, azaz minél nagyobb számban vannak benne nagy luminozitású kék csillagok (Sa-tól Sc felé növekszik).



8.9. ábra: Spektrális energia-eloszlás diagram (SED) az M51 spirálgalaxisra (folytonos vonal) és az Arp220 ULIRG-re (szaggatott vonal). A fekete vonalak a mért spektrumokat mutatják: az M51-et $z=0,1$; az Arp220 spektrumát $z=1$ vöröseltolódásnál. A piros görbék mindkét spektrumot $z=0,05$ vöröseltolódásnál ábrázolják. (Walcher, J. et al. 2010, <http://ned.ipac.caltech.edu/level5/March10/Walcher/Walcher3.html>)



8.10. ábra: Az M82-es csillagotó galaxis spektrális energia-eloszlás diagramja. A pontozott szaggatott vonal a szinkrotron sugárzást, az apró szaggatott vonal a HII zónák és fiatal csillagok sugárzását, a szaggatott vonal pedig a csillagközi por sugárzását jelzi.



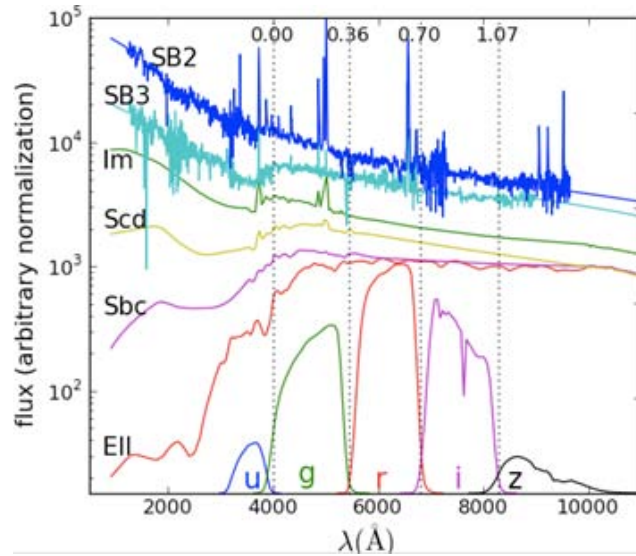
8.11. ábra: A SED jellemző alakja a maximum környezetében elliptikus galaxisokra (bal), és Sc vagy Irr galaxisokra (jobb) jelentős csillagkeletkezéssel. Látható, hogy az elnyelési fém vonalak 4000Å hullámhossznál „letörést” eredményeznek az elliptikus galaxis SED-jén. Az aktív csillagkeletkezést mutató galaxis emissziós vonalainak járuléka nem elhanyagolható, különösen a H α vonalé (sdss.org).

8.1.7. A galaxisok színe

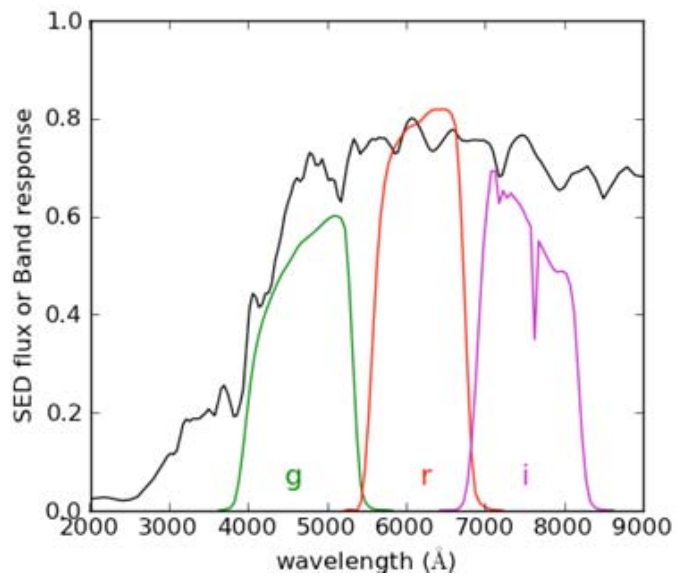
8.1.7.1. A SED és a színindexek kapcsolata

A megfigyelt spektrális energia-eloszlás részben a fizikai tulajdonságoktól, részben az objektum vöröseltolódásától függ. Megfelelően megválasztott szűrőrendszerrel a SED fő részeit mérve mind a vöröseltolódásra, mind az objektum típusára következtethetünk (lásd 8.12. és 8.13. a; b; c ábrákat. Látható, hogy az ultraibolya és kék sávok a többi sávhoz képest erős változást mutatnak morfológiai osztály függvényében. Ezért az ezekkel képzett

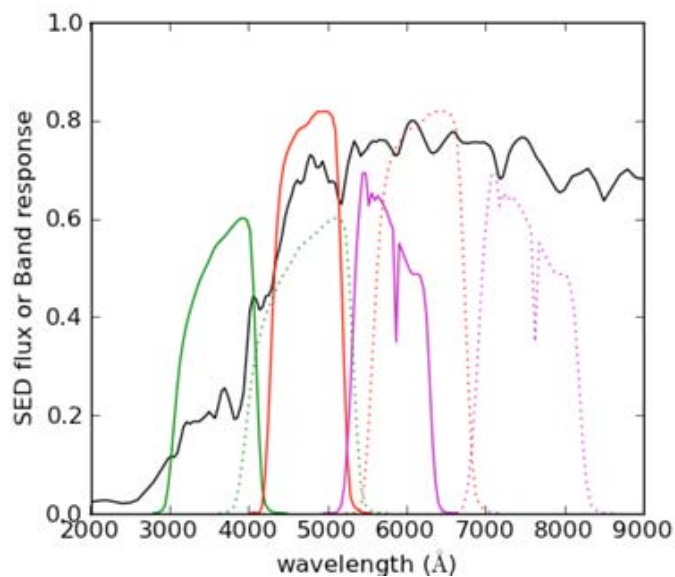
színindexek is informatív mennyiségek. A 8.13. ábra sorozat a vöröseltolódás hatását követi nyomon. Korlátok között, de pusztán az SDSS szélessávú fotometriai méréseiből megbecsülhető volt a galaxis vöröseltolódása (úgynevezett fotometriai vörösödés).



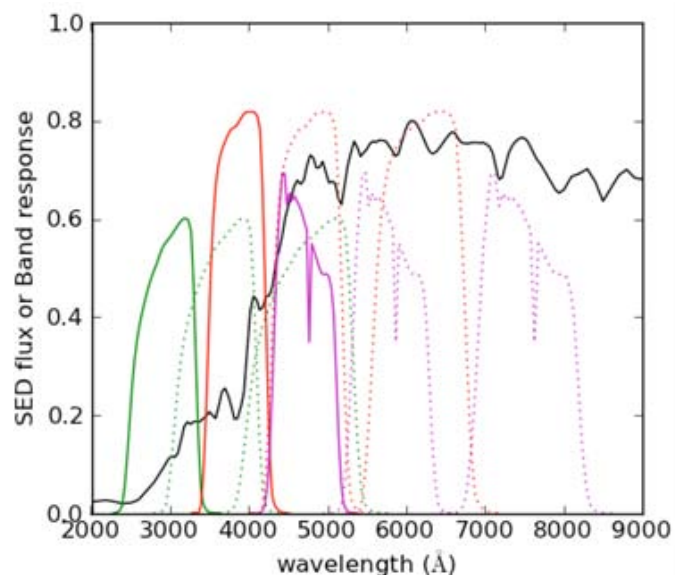
8.12. ábra: Különböző galaxistípusok jellemző SED-jei és az SDSS felmérés fotometriai rendszere. Látjuk, hogy a nulla vörösödésű objektumok SED-jeinek mely tartományait mérték az u; g; r; i és z szűrővel (Nakajuma 2011, lásd még Függelék).



8.13. a ábra: Elliptikus galaxis SED-je $z=0$ vöröseltolódásnál (Nakajima et al. 2011).



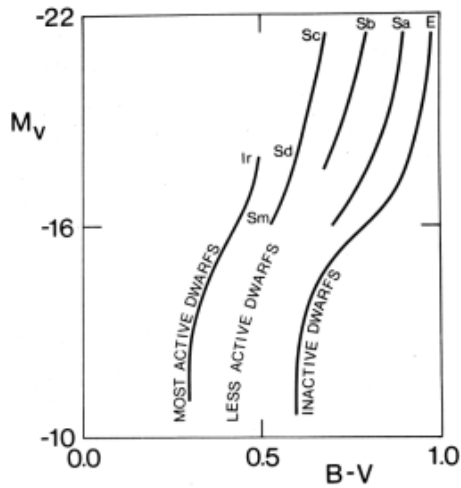
8.13. b. ábra: Elliptikus galaxis SED-je $z=0,3$ vöröseltolódásnál (Nakajima et al. 2011).



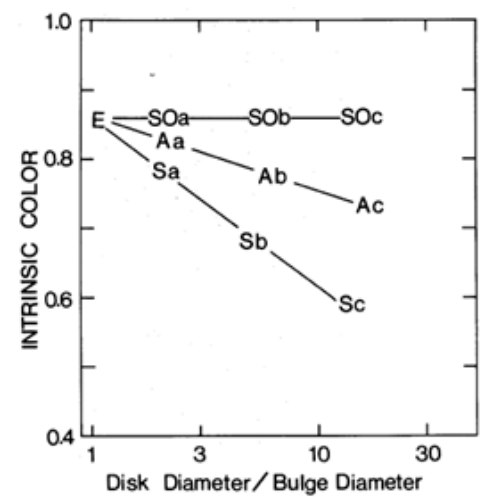
8.13. c. ábra: Elliptikus galaxis SED-je $z=0,6$ vöröseltolódásnál (Nakajima et al. 2011).

8.1.7.2. A galaxisok színe és morfológiai osztálya

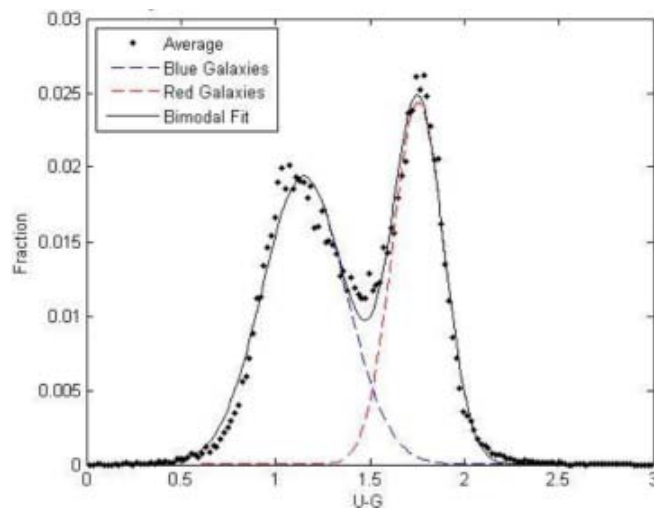
A galaxisok színe változó, és nem független morfológiai osztályuktól. A spirálgalaxisok általában vörösebbek, az elliptikusak kékebbek, mint az $M_V(B-V)$ szín-fényesség diagramon (8.14. ábra) van den Bergh (1977) eredményeként bemutatjuk. A szín-szín diagramokon is megfigyelhetjük. Ez nem meglepő, hiszen a Hubble-féle morfológiai osztályozás elsődleges szempontja volt az aktív csillagkeletkezés nyomainak, vagy hiányának megállapítása.



8.14. ábra: A galaxisok sematikus szín-fényesség diagramja (van den Bergh 1977).



8.15. ábra: A van den Bergh féle galaxis osztályok korong-dudor aránya és vörösödés-mentes B-V színindexe (van den Bergh 1976).



8.16. ábra: Bimodalitás az SDSS u-g színindexben a $z < 0,1$ galaxisokra. A nagyobb u-g színindex „vörösebb” galaxist jelent. A kék (blue) csoportban az Sb, Sc és Irr, a vörös (red) csoportban E, S és Sa galaxisokat találjuk (Liu 2012).

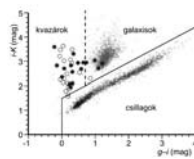
Az SDSS fotometriai felmérés automatikus klasszifikációs algoritmusában a galaxis spektroszkópiai típusát (valójában a SED típusát) egy törtszám jellemzi, amelyet 0,01 pontossággal adnak meg, és lényegében azt méri, hogy mennyire „kék” vagy „vörös” az adott galaxis. Szembeötlő a bimodalitás a galaxisokra. Nagy többségük két fő fotometriai típus egyikébe teljes biztonsággal besorolható: így beszélhetünk „kék” és „vörös” galaxisokról. A két osztály morfológiai sajátosságai (központi koncentrációja) szintén különböző. Ez az osztályozás részben megfeleltethető a Hubble-típusoknak: a kék galaxisok nagy része spirális, a vörös galaxisok nagy része elliptikus ugyan, de bizonyítható, hogy a megfelelés nem tökéletes: vannak kék elliptikus és vörös spirális galaxisok is, mintegy 10% arányban. Az átmeneti vagy bizonytalan besorolású objektumok csoportja nem nagy, illetve az átfedés mértéke fotometriai hibákkal magyarázható. A galaxisok típusára utalhat a koncentrációs index is, annak a két apertúrának az aránya, amely a galaxis fényének 50%-át, illetve 90%-át tartalmazza. Az összefüggés nem szigorú: az elliptikus galaxisok koncentrációs indexe általában 2,5-nél nagyobb, de vannak ilyen megjelenésű spirálgalaxisok is.

8.1.7.2. A bimodalitás oka – a kék felhő és a vörös sorozat kapcsolata

A galaxis fejlődési elméletek magyarázatot adnak arra, hogyan lesz spirálgalaxisokból óriás elliptikus galaxis. Ez a szín-fényesség, vagy szín –tömeg ábrákon a hideg gázban gazdag és csillagkeletkezést mutató galaxisok úgynevezett *kék felhőjéből* (blue cloud) a csillagkeletkezést már nem mutató, hideg gázban szegény galaxisok által alkotott úgynevezett *vörös sorozatba* (red sequence) migrálást jelenti. Bővebben lásd a 9.3-as alfejezetben!

8.1.7.3. *A galaxisok spektrofotometriai osztályozása - klasszifikáció a szín-szín diagramon* Kozmológiai távolságok esetén a legtöbb objektum csillagszerű vagy igen kicsi, ebből következően a Hubble-osztályokat távoli galaxisok esetén nem lehet értelmezni. Ahogyan láttuk, az ismert morfológiájú galaxisok integrális fotometriai tulajdonságait meghatározva, a korai típusú galaxisok vörösebbek, és jellegzetes nem skálainvariáns spektrummal rendelkeznek. A késői típusba tartozóak inkább kékek, erős emissziós vonalaik aktív csillagképződést jeleznek. A közeli galaxisok integrális paraméterei felhasználásával olyan elveket alapozhatunk meg, melyekből kozmológiai távolságokig, nagy statisztikus mintán kapunk képet a galaxisok fejlődéséről.

A spektrális energia-eloszlás alapján kék és vörös típusú normál galaxisokat, csillagontó galaxisokat, aktív galaxisokat és kvazárokat különböztetünk meg, és megadjuk az abszolút fényességet. A galaxisok kétszíndiagramján nagyjából elkülönülve találjuk a távoli közönséges galaxisokat az emissziós és aktív galaxisoktól. Egy megfelelően megválasztott színszűrő rendszerrel szélessávú fotometrián alapuló színindexek terében is külön lehet választani a csillagokat, a közeli Univerzum galaxisait, és a kvazárokat. Példa erre az SDSS felmérés (lásd 8.18. ábra), melynek fotometriai rendszerét (lásd Függelék) épp erre tervezték. A spektrális energia-eloszlást jól tükröző SDSS színindexekkel fotometria alapú osztályozást végezhetünk.



8.18. ábra: Bimodalitás a g-i színindexben (Szabó Gy. 2009, <http://www.matud.iif.hu/09okt/04.htm>)

8.1.8. Schechter-féle luminozitási függvény

A Φ luminozitási függvény megadja, hogy térfogat-egységként egy adott abszolút magnitúdójú, avagy adott luminozitású objektumból hány darab van. Galaxisokra, kvazárokra a felmérések eredményeihez illesztik a függvényeket. A Schechter-függvény elméleti alakja (Schechter 1976):

$$\Phi\left(\frac{L}{L_c}\right) = \Phi_c \left(\frac{L}{L_c}\right)^\alpha \exp\left(-\frac{L}{L_c}\right) \quad \text{ahol: (8.13)}$$

$$-1,3 \leq \alpha \leq -1 \quad (8.13a)$$

$$L_{B,C} = 10^{10} L_{B,N_{2p}} h^{-2}$$

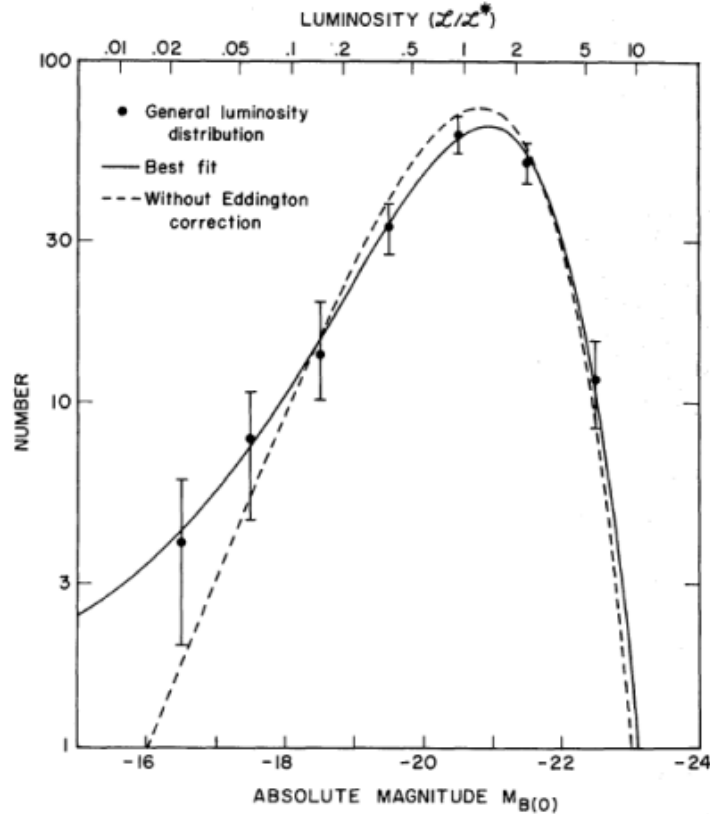
$$\text{avagy: } M_{B,C} = -19,5 + 5 \log h \quad (8.14)$$

$$\Phi_C = 0,01 \text{Mpc}^{-3} h^3$$

$$(8.15)$$

$$h = \frac{H_0}{100 \text{kms}^{-1} \text{Mpc}^{-1}} 0,01 \text{Mpc}^{-3} h^3$$

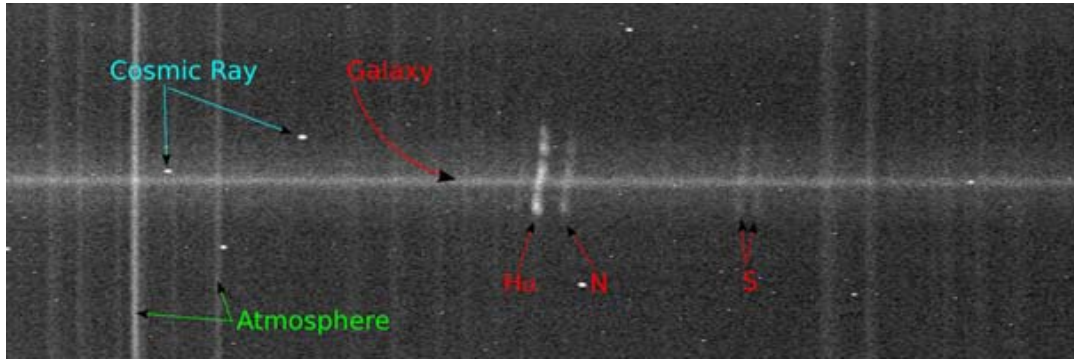
$$\text{ahol a Hubble állandó: } H_0 = 67,80 \pm 0,77 \text{kms}^{-1} \text{Mpc}^{-1} \quad (8.16)$$



8.19. ábra: A tapasztalati luminozitási függvény Schechter (1976) szerint (folytonos vonal).

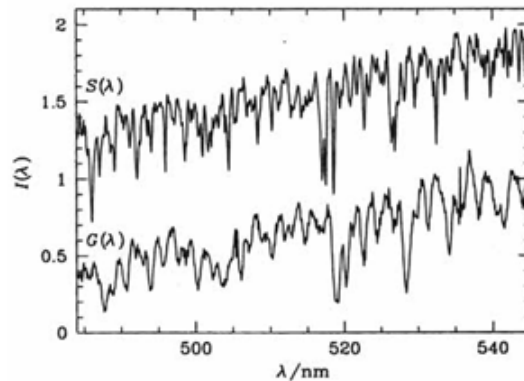
8.1.9. Galaxis spektruma – spektrumvonalak

Az ionizált oxigén [OIII] és nitrogén [NII] vonalainak a hidrogén Balmer sorozat vonalaihoz viszonyított relatív erőssége alkalmas a csillagkeletkezést nem mutató „vörös” galaxisok (S0, és E) és a csillagkeletkezésben aktív (spirál és Irr típusok), vagy nukleáris aktivitást mutató (AGN) galaxisok elkülönítésére (lásd 8.22. és 8.23. ábrák). A galaxisok spektruma csillagpopulációjuknak és csillagközi anyag tartalmuknak megfelelő vonalakat mutat, aktivitásuknak megfelelően emissziós vonalakkal, vagy anélkül. Ennek megfelelően a könnyen azonosítható tipikus elnyelési vonalak a látható tartományban a kalcium H és K vonala (393,37nm és 396,85nm); a magnézium 517,53nm-es és a nátrium 589,4nm-es vonala. Az emissziós vonalak tipikusan a hidrogén Balmer sorozatának vonalai, az ionizált oxigén a nátrium és kén, vonalai.



8.20. ábra: Résspektrum egy emissziós vonalakat mutató csillagontó galaxisról. Az atmoszféra vonalai (a teljes sávot átszelő a spektrumkép hossztenegelyére merőleges vonalak) és kozmikus részecske beütések (fényes, apró foltok) között a galaxis spektrumvonalai rövidebb, (a galaxis forgása miatt) ferde csíkcsohkák. A hidrogén Balmer α , a nitrogén egy és a kén két vonalát látjuk. A vonalak ferdeségének magyarázatát lásd a következő alfejezetben.

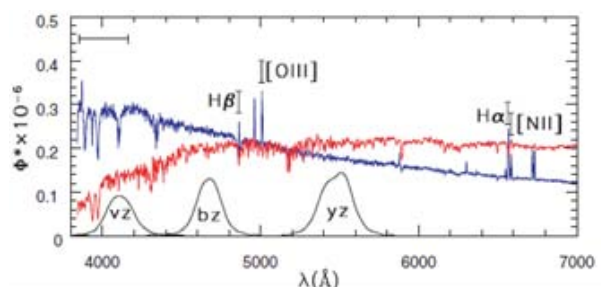
Az elliptikus galaxisok spektruma a K óriásokéra emlékeztet, ezért ezeket gyakran modellezik K óriás minta spektrum felhasználásával.



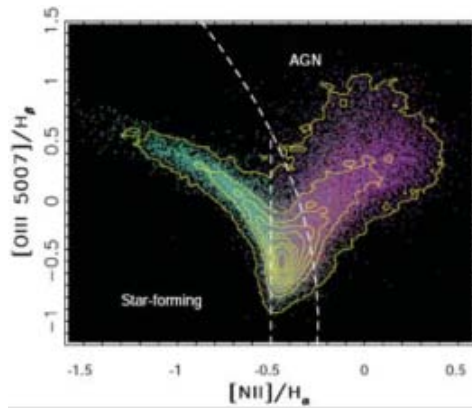
8. 21. ábra: Az NGC2549 lencse galaxis (G) és egy K óriás csillag spektrum részlete az 518nm-es Mg b elnyelési vonal környezetében. A galaxis spektrum hasonló, de a vonalvastagságok lényegesen nagyobbak. (Whittle, http://www.astro.virginia.edu/class/whittle/astr553/Topic07/t7_spec_K0_galaxy.jpg)

8.1.9.1. Színképek és bimodalitás

Az ionizált oxigén [OIII] és nitrogén [NII] vonalainak a hidrogén Balmer sorozat vonalaihoz viszonyított relatív erőssége alkalmas a csillagkeletkezést nem mutató „vörös” galaxisok (S0, és E) és a csillagkeletkezésben aktív (spirál és Irr típusok), vagy nukleáris aktivitást mutató (AGN) galaxisok elkülönítésére (lásd 6.20. és 6.21. ábrák).



8.22. ábra: Bimodalitás a spektrumokban. Tipikus kék és tipikus vörös galaxis színképe, alul a Strömgen fotometriai sávok szűrőinek áteresztési függvényei. A megjelölt spektrumvonalak alkalmasak a csillagontó és aktív magú (AGN) galaxisok szeparálására (Smol'ci'c et al. 2006)

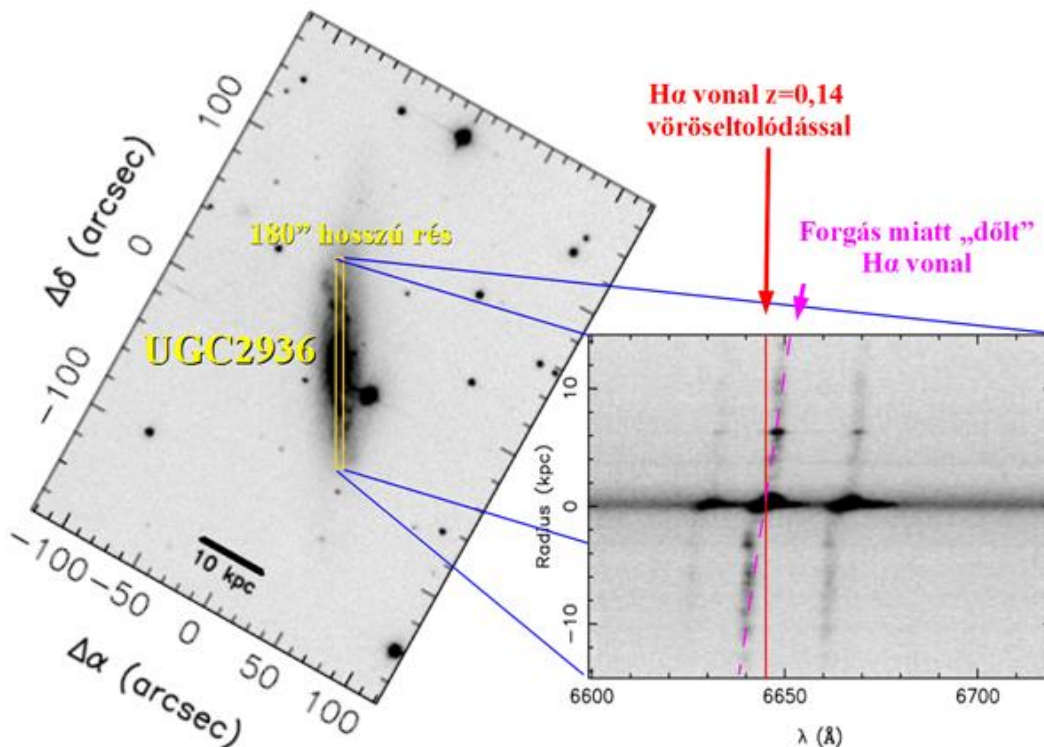


8.23. ábra: Emissziós spektrumot mutató galaxisok osztályozása a spektrumvonalaik alapján jelentős csillagkeletkezést mutató és AGN típusokra (Smol'čić et al. 2006).

8.2. A galaxisok tömege

8.2.1. Rotációs spektrum

Slipher a „nebulák” spektrális elemzéséből nem csak a vonalak eltolódását, hanem ferde alakját is megfigyelte, utóbbi tényből azok forgására következtetett. A csillagászati spektroszkópia a 20. század elején a kiterjedt objektumok rés-spektrumát elemezte. A fotografikusan rögzített spektrum, mint kép, a résre merőleges. A megfigyelt galaxis részletei a rés mentén a felbontásnak megfelelően a spektrográffal egy-egy vékony spektrum csíkot adnak. Ha a rés mentén a galaxisban változnak a spektrális jellemzők, akkor a vékony résspektrumok sem lesznek azonosak. Ha például a rés mentén a galaxisban sebesség gradiens van, akkor a vékony elemi spektrumok egymáshoz képest relatív hullámhossz eltolódást fognak mutatni, amit a spektrumvonalak „megdőlése”-ként észlelünk. A jelenséget a 8.24. ábrán az UGC2936 SB morfológiai osztályú Seyfert 2 típusú (emissziós vonalas) galaxisra mutatjuk be (Pickering 1999 ábrái felhasználásával). Slipher a dőlt spektrumvonalakat a Naprendszer bolygói után az NGC 4594 avagy M104 (Sombrero galaxis) vonalaira mérte ki.

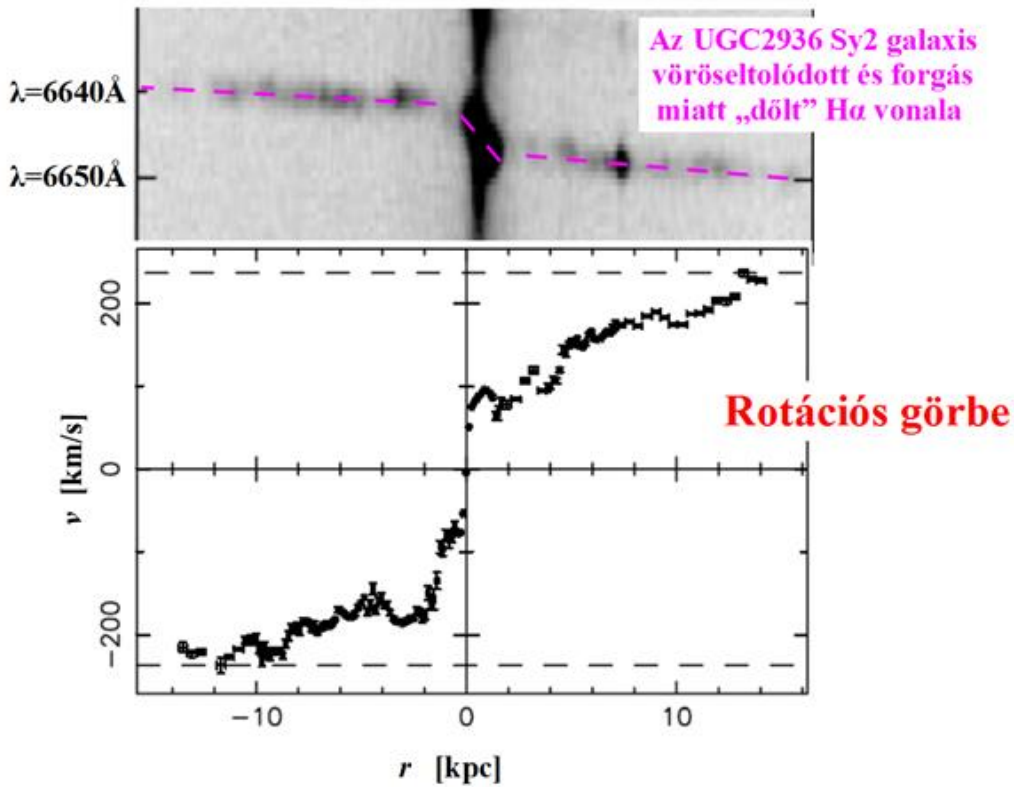


8.24. ábra: Megfigyelt rés spektrum az UGC 2936 emissziós vonalas galaxisra. A vöröseltolódott H α vonal „dőlését” is bemutatjuk. (Pickering 1999).

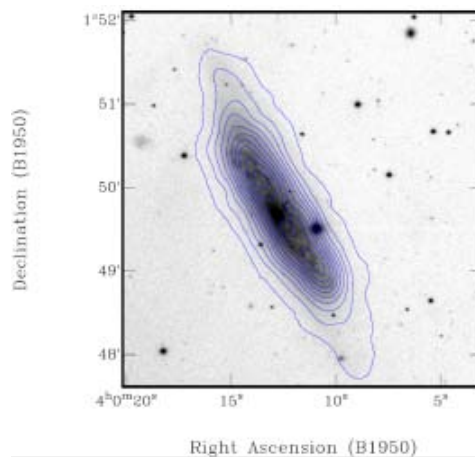
A dőlt spektrumvonal elemzésével megadható az észlelt galaxis látszó sebesség gradiense a galaktocentrikus távolságok függvényében (lásd 8.24. ábra). Amennyiben ez a grafikon forgást jelez, a galaxis rotációs görbéjének mondjuk.

8.2.2. A rotációs görbe

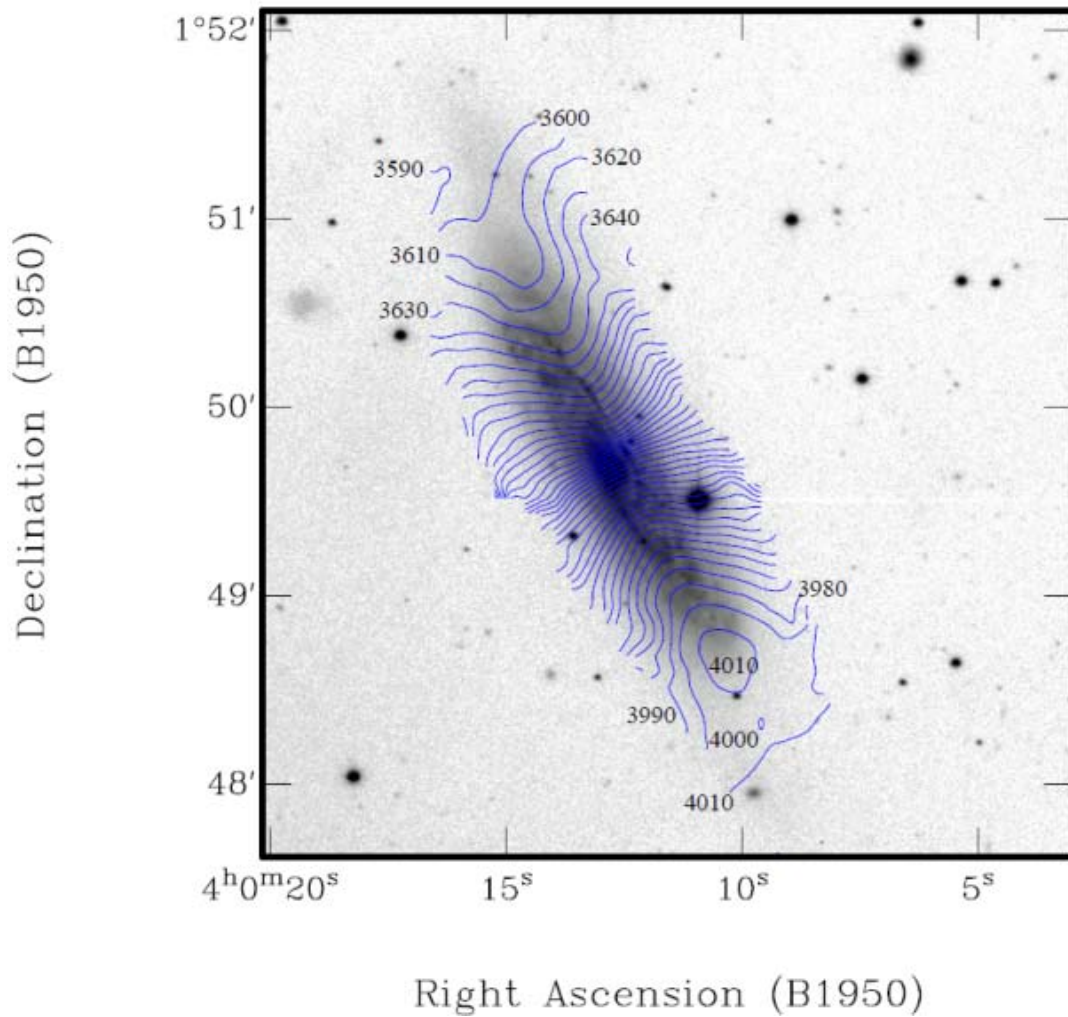
A radiális sebességeket meghatározhatjuk és ábrázolhatjuk a galaxis egy önkényesen felvett tengelye mentén. Az ilyen úgynevezett rotációs görbéket származtathatjuk látható tartományban mérve, vagy amennyiben a galaxisban neutrális hidrogén gáz található, akkor HI 21cm-es vonal rádió spektroszkópiájából is.



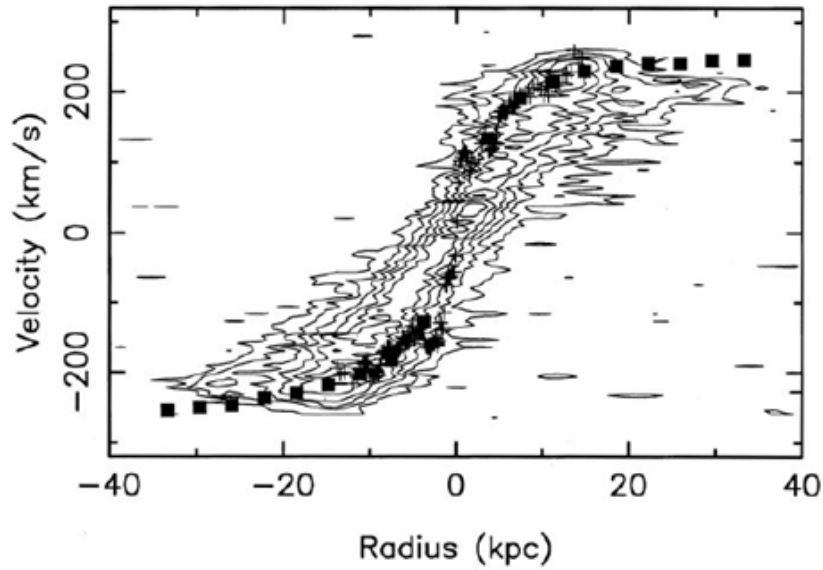
8.25. ábra: Az UGC 2936 Seyfert 2 galaxis résspektrumából H α vonalának szerkezete (fent), és a származtatott radiális sebességprofil (lent), (Pickering 1999).



8.26. ábra: A HI 21cm-es spektrumvonal vonal alatti területe az UGC 2936 galaxis optikai képén. Látható, hogy a HI kiterjedtebb, de nagyon hasonló szerkezetű galaxist mutat. (Pickering 1999)



8.27. ábra: A radiális sebesség eloszlása az UGC 2936 galaxisban a HI 21cm-es vonal méréséből. A sebességet egy adott irányban, az abban az irányban mért spektrumvonal eltolódásából vett Doppler sebesség adja meg. Az azonos sebességű pozíciókat szintvonalakkal kötjük össze (isovelocity contours). Számos kontúrunk a megfelelő radiális sebességet is feltüntetjük (Pickering 1999).

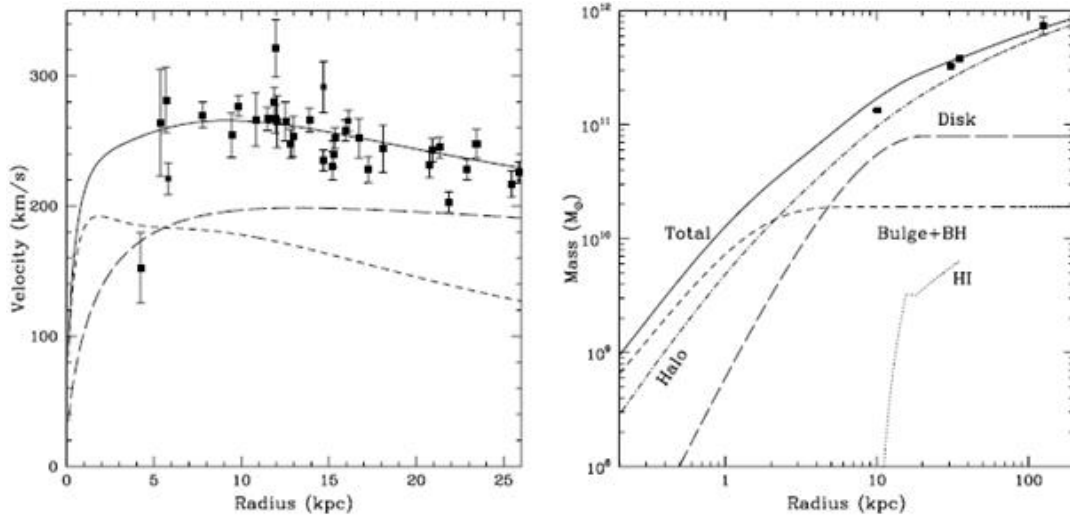


8.28. ábra: A rotációs görbe HI21cm-es mérésekből (kontúrok) és optikai spektrumból (szimbólumok).

8.2.3. A tömegeloszlás

A tömegeloszlásra iterációs eljárással olyan függvényt keresünk, mely az adott galaxis rotációs görbéjének megfelel. A szintetikus eloszlás a galaxis fő alrendszerére tett tömegeloszlásokból adódik, azok felösszegzésével.

$$\theta = \sqrt{V_{\text{gáz}}^2 + V_{\text{korong}}^2 + V_{\text{öböl}}^2 + V_{\text{haló}}^2} \quad (8.17)$$



8.29. ábra: Az M31 rotációs görbéje (bal) és tömegeloszlás modellje (jobb). A mérési pontokat tele négyzetek jelölik a sebesség mérés hibájával. A galaxis fő komponenseinek tömegeloszlására adott modellt a szatelita galaxisokkal ellenőrizhetjük a külső Haloban (tele négyzetek). Látszik, hogy nagy kiterjedésű sötét anyag halo (ΛCDM modell) szükséges a modellbe (Seigar 2007).

8.3. A gravitációs lencse jelenség

8.3.1. Távolságok

- **a fény utazásának távolsága (light travel distance, D_l)** az Univerzum tágulása miatt sem az együttmozgó távolsággal, sem a szögátmérő távolsággal nem egyezik meg.
- **együttmozgó távolság (comoving distance, D_c)** a definíció szerint egy vonal mentén mérhető távolság, amit a MOST kozmológiai időpontban definiálunk. Azaz ez pontosan megadja, hogy a fényforrás éppen hol van tőlünk a z vöröseltolódású fény beérkezésének a pillanatában.
- **átlós együttmozgó távolság (transverse comoving distance, D_m)** két azonos z vöröseltolódású, egymástól $\delta\theta$ szögtávolságra lévő objektum egymástól mért $\delta\theta D_m$ távolságából számítható.
- **szögátmérő távolság (angular diameter distance, D_a)** az objektum látszó és valódi méretéből ad egy távolságadatot. Jó közelítéssel azt a távolságot adja meg, amely a táguló Univerzumban a két pont között volt a fény elindulásakor. Az értékét a D_m átlós együttmozgó távolságból számítják a következő képlet szerint:

$$D_a = \frac{D_m}{1+z} \quad (8.19)$$

Legyen Ω_m az Univerzum teljes tömegsűrűsége, Ω_Λ pedig a sötét anyag sűrűsége, a görbület pedig: $\Omega_k = 1 - \Omega_m - \Omega_\Lambda$. Sík térmodell ($\Omega_k=0$) esetén $D_m=D_c$, azaz ekkor igaz, hogy:

$$D_a = \frac{D_c}{1+z} \quad (8.20)$$

D_c adja a jelenlegi távolságot és D_a az induláskorit.

8.3.2. Gravitációs lencsézés rövid története

Talán meglepő módon a gravitációs lencsék fizikai leírásának története egészen a 19. század elejéig nyúlik vissza. Tudománytörténeti összefoglalót Richard Ellistől olvashatunk (Ellis 2010), itt csak néhány fontosabb mozzanatot említünk:

- 1804-ben Johann Soldner (Soldner 1804) kiszámolta, hogy a fény elhajlik egy nagy tömegű csillagászati objektum mellett, a Napra ez 0,84 ívmásodperc.
- 1911-ben Albert Einstein Newton-i fizikával (a fotont részecskének tekintve) a napra 0,83 ívmásodperc eltérítést számít ki (lásd 8.21. egyenlet).
- 1912-ben Einstein leírja a lencse egyenletet, és kiszámítja, hogy nagyított illetve kettőzött képet látnánk
- 1913-ban George Ellery Hale-t (Mt. Wilson Observatory) kéri fel észlelésre
- 1914-ben a Krím-félszigetről mérnék napfogyatkozásakor, de kitör az I. Világháború
- Arthur Eddington és munkatársai az 1919-es napfogyatkozásakor kimérik a gravitációs lencse hatást, és igazolják Einstein predikcióját (Dyson et al. 1920).
- Már 1924-ben felmerül, hogy a gravitációs lencsézés megkettőzheti csillagok képét (Chwolson 1924).
- 1937-ben Zwicky vetette fel, hogy ki lehetne használni a galaxisok és halmazaik gravitációs lencse hatását és fényerősítését távoli objektumok tanulmányozására, valamint a lencse hatásból ki lehetne számítani a lencse objektum teljes (látszó+sötét) tömegét

- 1968-ban Barnóthy Jenő (Barnóthy & Barnóthy 1968) a kvazárok különösen nagy luminozitását a gravitációs lencse hatások eredményeként létrejövő fényerősítéssel magyarázza.

Az eltérítés α szöge Newtoni mechanikával (a fotont részecskének tekintve):

$$\alpha = \frac{2GM}{c^2} \frac{1}{r} \quad (8.21)$$

Az Általános Relativitás Elmélet alapján (1919-ben):

$$\bar{\alpha} = \frac{4GM}{c^2} \frac{1}{r} \quad (8.22)$$

A Nap tömegét és sugarát helyettesítve:

$$\bar{\alpha} = \frac{4GM_{\odot}}{c^2} \frac{1}{r_{\odot}} = 1.74'' \quad (8.23)$$

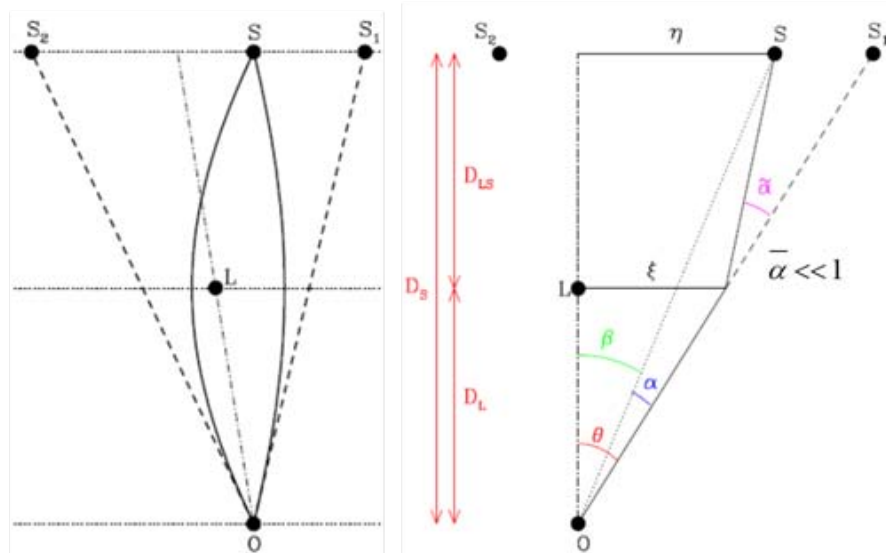
8.3.3. A lencse-egyenlet:

A 8.30. ábra egy gravitációs lencse hatás vázlatos bemutatása. Az úgynevezett vékony gravitációs lencse közelítést alkalmazzuk (*thin lens approximation*, Blandford & Kochanek 1988). Az S jelű forrásnak az L jelű tömeg lencse hatása miatt S1 és S2 jelű képeit látjuk az O jelű észlelő pozícióból. Az α , β , θ ,

$\tilde{\alpha}$

szögek kicsik. Az ábrán a D_S , D_{LS} és D_L szögátmérő távolságok (lásd 8.3.1. alfejezet).

Gravitációs lencse – geometriai vázlat, változók bevezetése



8.30. ábra: A gravitációs lencse jelenség vázlatos geometriája

Az ξ sugáron belüli $M(\xi)$ tömeg által okozott eltérülés:

$$\tilde{\alpha}(\xi) = \frac{4GM(\xi)}{c^2} \frac{1}{\xi} \quad (8.24)$$

Az ábrából látszik, hogy amennyiben θ , β és $\tilde{\alpha} \ll 1$, akkor:

$$\theta D_s = \beta D_s + \tilde{\alpha} D_{LS} \quad (8.25)$$

Bevezetjük az $\alpha(\theta)$ redukált elhajlási szöget:

$$\alpha(\theta) = \left(\frac{D_{LS}}{D_s} \right) \tilde{\alpha}(\theta) \quad (8.25)$$

A lencse egyenlet:

$$\beta = \theta - \alpha(\theta) \quad (8.26)$$

Ha nem szimmetrikus a tömegeloszlás, akkor vektorosan kell felírunk, ezt a 2D lencse-egyenlet:

$$\vec{\beta} = \vec{\theta} - \vec{\alpha}(\vec{\theta}) \quad (8.27)$$

Arthur Eddington és munkatársai már az 1919-es napfogyatkozáskor kimérték az eltérítést, ami a második mérési bizonyíték volt az Általános Relativitás Elmélet mellett. (Az első a Merkúr perihélium vándorlása volt).

8.3.4. Az Einstein-sugár

A 8.30. ábrából leolvasható, hogy:

$$\xi = D_L \theta \quad (8.28)$$

A lencse-egyenlet (8.26), az M tömegű tömegpontra a (8.24) egyenlet szerinti elhajlási szög és a (8.28) egyenletet felhasználva:

$$\beta(\theta) = \theta - \frac{D_{LS}}{D_L D_s} \frac{4GM}{c^2 \theta} \quad (8.29)$$

Ha az S forrás pontosan L mögötti, akkor $\beta=0$, és kör alakú képet kapunk, az úgynevezett Einstein gyűrűt, θ_E sugárral (lásd 8.31. ábra). Az Einstein sugár:

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_L D_s}} \quad (8.30)$$

Az Einstein sugár határozza meg a gravitációs lencse jelenség szög-skáláját.

Egy L nagytömegű ($M_L \approx 10^{12} M_\odot$) galaxisra $z_L = 0,5$ vöröseltolódással és egy távolabbi S forrásra $z_S = 2,0$ vöröseltolódásoknál, $H=50\text{km/s/Mpc}$ értéket feltételezve az ívmásodpercben kifejezett Einstein sugár:

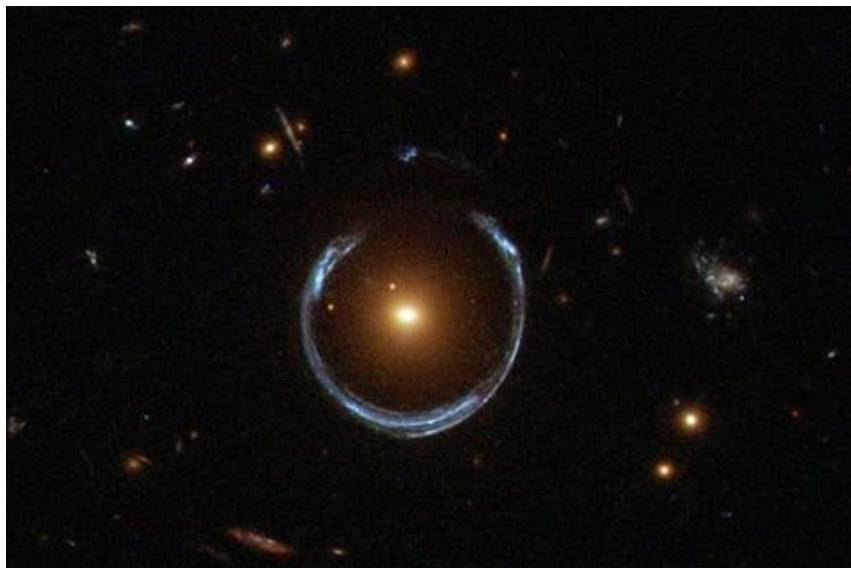
$$\theta_E \approx 1,8 \sqrt{\frac{M}{10^{12} M_{\text{Nap}}}} \text{ ívmásodperc} \quad (8.31)$$

Kozmológiai távolságokat feltételezve általában:

$$D_{LS} \approx D_s - D_L \quad (8.32)$$

Ha egy a Tejútrendszer korongjában lévő csillag okoz gravitációs lencsehatást egy bulge csillagnak, akkor az Einstein sugár:

$$\theta_E \approx 0,9 \sqrt{\frac{M}{M_{\text{Nap}}} \frac{D}{[10 \text{ kpc}]}} \text{ ezredívmásoderc} \quad (8.33)$$



8.31. ábra: Einstein gyűrű. Az LRG 3-757 a Hubble Space Telescope's Wide Field Camera 3 felvételén (ESA/Hubble & NASA http://apod.nasa.gov/apod/image/1112/lensshoe_hubble_3235.jpg).

Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:

Barnothy, J. & Barnothy, M. F. 1968: „Galaxies as gravitational lenses.” Science 162, 348–352., doi:10.1126/science.162.3851.348

Chwolson, O., 1924: „Über eine mögliche Form fiktiver Doppelsterne”, Astron.Nachr., 221, 329.

Cserepes László, Petrovay Kristóf, 1993: „Kozmikus fizika, Egyetemi jegyzet fizikushallgatók számára (Kézirat)”, ELTE Természettudományi Kar, Budapest.

Departamento de Astronomía de la Universidad de Guanajuato: „Galactic Astronomy”, http://www.astro.ugto.mx/cursos/GalacticAstronomy/GA_chap1.pdf

de Vaucouleurs, G.H., 1961: „Integrated Colors of Bright Galaxies in the u, b, V System.”, 1961ApJS....5..233D

de Vaucouleurs, G.H., et al. 1964: „Reference catalogue of bright galaxies” RC1, <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-source=VII/16>

Dyson, F.W., Eddington, A.S., and Davidson, C.R., 1920: „A determination of the detection of light by the sun's gravitational field from observations made at the total eclipse of May 29, 1919”, Mem. R. Astron. Soc., 62, 29

Einstein, A., 1911: Annalen der Physik, 35, 898.

Einstein, A. 1915: „Die Feldgleichungen der Gravitation”. Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 844–847.

- Einstein, A. 1916:** "Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie" (PDF), *Annalen der Physik* 49,
- Ellis, R.S. 2010:** „Gravitational lensing: a unique probe of dark matter and dark energy”, *Phil. Trans. R. Soc. A* 2010 368, doi: 10.1098/rsta.2009.0209
- Faber, S. M. et al. 2007:** „Galaxy Luminosity Functions to $z \sim 1$ from DEEP2 and COMBO-17: Implications for Red Galaxy Formation”, *ApJ*...665..265F
- Ferguson, A.J. et al. 2002:** „Evidence for Stellar Substructure in the Halo and Outer Disk of M31”, *AJ*...124.1452F
- Győry Zsuzsanna, 2008:** „Korai és késői típusú galaxispopulációk vizsgálata a Sloan Digital Sky Survey alapján”, ELTE TTK PhD dolgozat, **Haas, M. et al., 1998:** „Cold dust in the Andromeda Galaxy mapped by ISO”, *A&A*, 338,L33
- Holmberg, E. 1958:** „A photographic photometry of extragalactic nebulae.”, *Lund Medd. Astron. Obs. Ser. II*, 136, 1
- Kozmológiai távolság számító (Cosmology calculator):** <http://www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html>
- Lagache, G. et al. 2005:** „Dusty infrared galaxies: Sources of the Cosmic Infrared Background”, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 43, http://ned.ipac.caltech.edu/level5/March05/Lagache/Lagache_contents.html
- Lauberts, A., & Valentijn, E.A. 1989:** „The Surface Photometry Catalogue of the ESO/Uppsala Galaxies”, European Southern Observatory, Garching (ESO-LV katalógus)
- Liu, T. 2012:** „The Distribution, Classification, and Color Evolution of Galaxies Since $z \sim 0.5$ in the Sloan Digital Sky Survey”, http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042612-111755/unrestricted/MQP_Report.pdf
- Nakajima, R. 2011:** „Photometric Redshifts in SDSS for Galaxy-Galaxy Lensing”, INPA Talk, May 20, 2011
- NOAO Newsletter - March 1994 - Number 37, <http://www.noao.edu/noao/noaonews/mar94/>
- Pickering T.E. et al. 1999:** „Kinematics and Neutral Hydrogen Properties of the Giant Low Surface Brightness Galaxy UGC 2936”, *AJ*...118..765P
- Pohlen, M. & Trujillo, I., 2006:** „The structure of galactic disks
Studying late-type spiral galaxies using SDSS”, *A&A* 454, 759
- Schechter, P. 1976:** „An analytic expression for the luminosity function for galaxies.”, *ApJ*...203..297S
- Schombert J. 2007:** „ARCHANGEL Galaxy Photometry System”, astro.ph.3646S
<http://abyss.uoregon.edu/~js/archangel/archangel.pdf>
- Schombert J. 2011:** „ARCHANGEL: Galaxy Photometry System”, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1107.011 ascl.soft07011S, <http://abyss.uoregon.edu/~js/archangel/screenshots.html>
- Siebenmorgen, R., 2004:** „SED model library of AGNs”, http://www.eso.org/~rsiebenm/agn_models/
- Siebenmorgen, R., 2004:** „SED model library of starbursts and ULIRGs”, http://www.eso.org/~rsiebenm/sb_models/
- Soldner, J. 1804:** Berliner Astronomisches Jahrbuch auf das Jahr 1804
- Walcher, J. et al. 2010:** „Fitting the integrated spectral energy distributions of galaxies”, http://www.eso.org/~rsiebenm/sb_models/astro-ph/1008.0395
- Whittle, M., „Graduate extragalactic astronomy - Web Notes”, <http://www.astro.virginia.edu/class/whittle/astr553/>**
- Zwicky, F. 1937:** „Nebulae as gravitational lenses.”, *Phys. Rev.* 51, 290–290. (doi:10.1103/PhysRev.51.290)

Zwicky, F., 1937b: „*On the Probability of Detecting Nebulae Which Act as Gravitational Lenses*”, Phys. Rev. Lett., 51, 679.

9. fejezet - Kölcsönható galaxisok

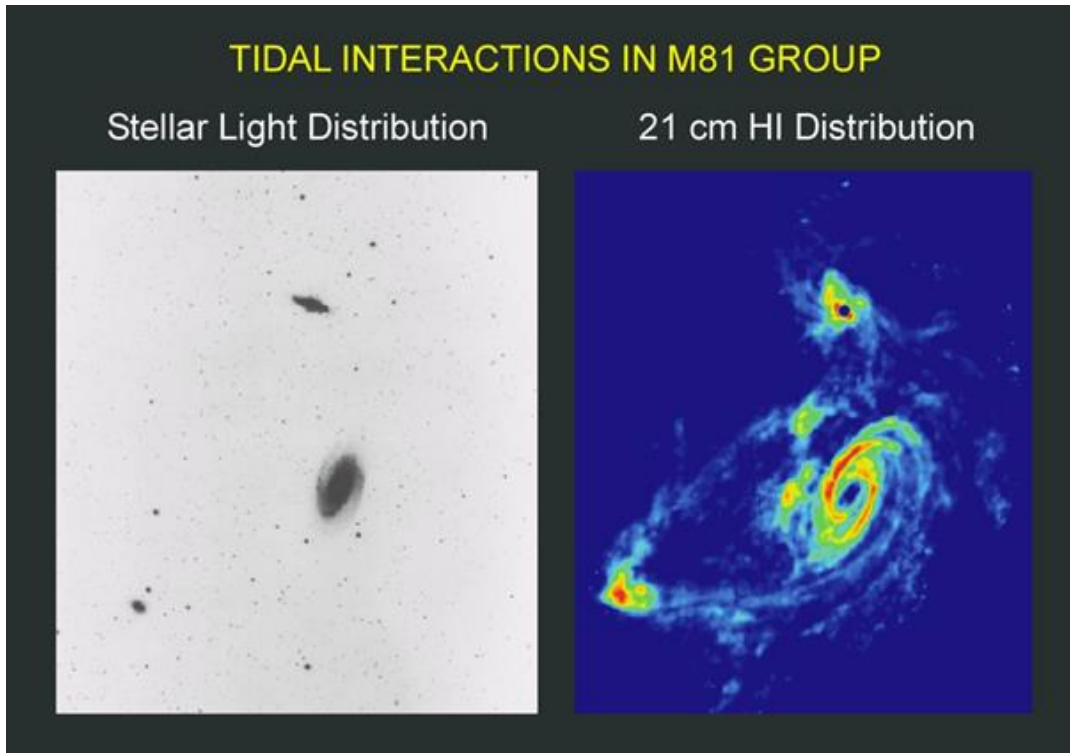
Példák a galaxisok közti kölcsönhatás fajtáira, és következményeire.

9.1. Megfigyelt kölcsönható rendszerek

A megfigyelt kölcsönható rendszerekre különféle példákat ad a 7.2.3. alfejezetben említett Arp-féle katalógus. Egy jellegzetes példa az NGC 6872/IC 4970 óriás kölcsönható galaxisok rendszere, melyet egy az ESO által készített videón is megtekinthetünk: <http://www.eso.org/public/videos/astronomy-ngc6872-ic4970/>. A Csápok avagy Antennae ütköző galaxis rendszert már William Herschel katalógusa is említi (NGC 4038, NGC 4039). Arp katalógusában ez a 244-es, mint kölcsönható galaxispár (lásd 9.1. ábra). A kölcsönhatás jelensége nem mindig tűnik fel a látható tartományban. Az egymástól még viszonylag távol elhelyezkedő galaxisok között is lehet tömegátadás, melyet például a semleges hidrogén gáz 21 cm-es vonalán térképezhetünk, mint például az M81, M82 és NGC 3077 galaxisok kölcsönható rendszerében (lásd 9.2. ábra).



9.1. ábra: A Csápok avagy Antennae (NGC 4038, NGC 4039) ütköző galaxis rendszer az ESO VLT FORS1 felvételeiből készített kompozit. A színskiosztás: kék – B (435nm); zöld – V (550nm); lila – H α + NII (658nm); piros – I (814nm). (ESO/A. Milani, 2011 <http://www.eso.org/public/images/potw1140a/zoomable/>)



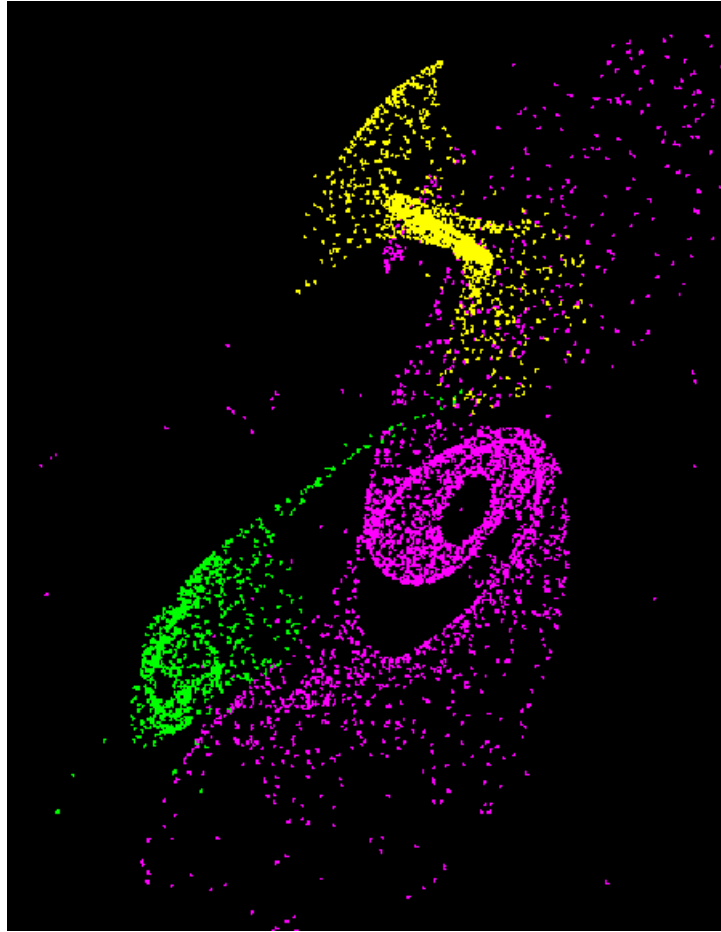
9.2. ábra: Az M81, M82 és NGC 3077 galaxisok kölcsönható rendszere látható (bal, Digital Sky Survey) és HI 21cm-es rádió vonalon (jobb, VLA) (Yun 1997).

9.2. Kölcsönható rendszerek modellezése

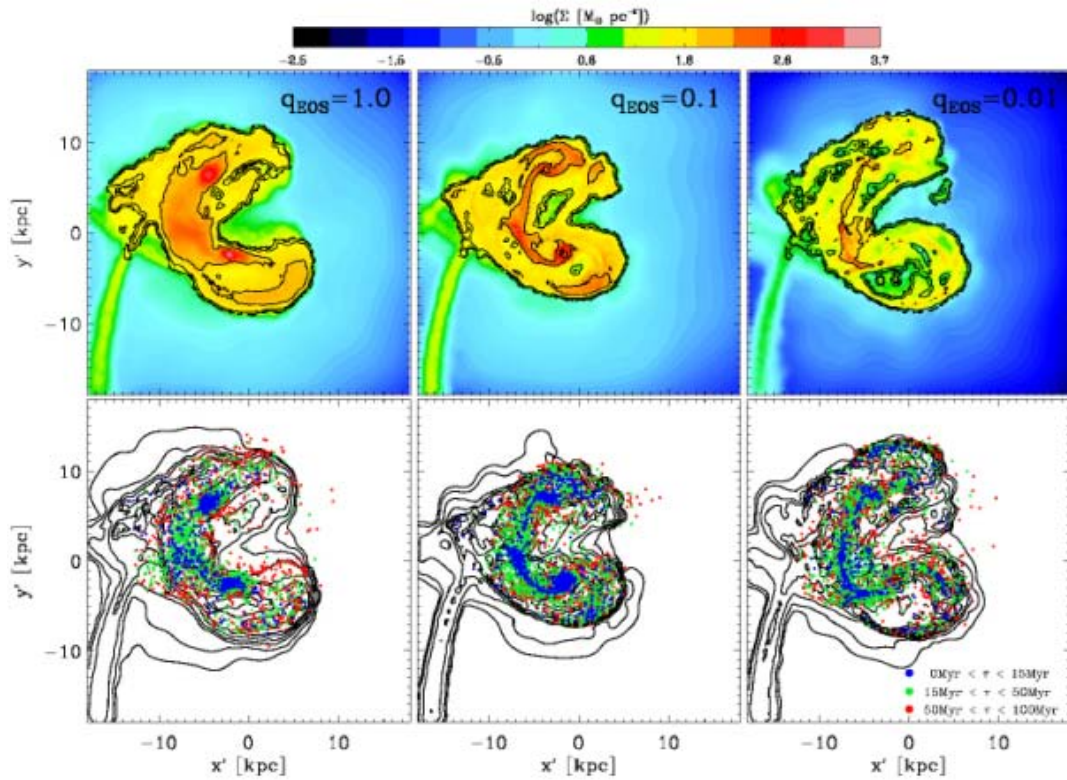
A kölcsönható rendszereket sokrészecskés numerikus szimulációkkal modellezik. Az egyszerűbb algoritmusok csak a gravitációs kölcsönhatást engedik meg, és egy korlátos elemszám mellett vizsgálódnak (lásd 9.3. ábra). A valódi jelenségben a csillagközi anyag jelentős része viszonylag rövid idő alatt csillagokká alakulhat, azaz a galaxis egyesülést csillagontó (starburst) folyamat kíséri. Az összetettebb numerikus szimulációk már a hűlést, csillagkeletkezést, és a csillagokból eredő fűtést is számításba veszik (lásd például Karl et al 2013). Karl és munkatársai a Csápok (Antennae) galaxist modellezték a GADGET szoftverrel (lásd például Springel 2005), mely egyesíti a részecske alapú és hidrodinamikai alapú (smoothed particle hydrodynamics, SPH) közelítéseket. Két

azonos tömegű spirálgalaxis ütközésekor összesen $N_{tot}=1,2 \times 10^6$ részecskével dolgoztak. Ebből $N_{DM}=4 \times 10^5$ db sötét anyag részecske $m_{DM}=1,2 \times 10^6 M_{Nap}$ tömeggel; $N_{bulge}=2 \times 10^5$ db bulge részecske; valamint $N_{korong}=6 \times 10^5$

db csillag-gáz részecske a korongban $m_{csillag}=4,8 \times 10^5 M_{Nap}$ csillag-részecske és $m_{gáz}=1,2 \times 10^5 M_{Nap}$ gáz-részecske tömeggel. A korong részecskék 35pc, a halo részecskék 150pc-es felbontást jelentenek a modellben. A csápok galaxis infravörös tartományban megfigyelt szerkezetét legjobban visszaadó model futási eredményt a 9.4. ábrán mutatjuk be.



9.3. ábra: Az M81, M82, és NGC 3077 kölcsönható rendszer modellje
<http://daisy.astro.umass.edu/~myun/m81model.gif>



9.4. ábra: A Csápok galaxis modellje a három oszlopban 3 különböző időfüggő csillagkeletkezési rátát alkalmazva (Karl et al. 2010). A felső sor a gáz felületi sűrűség eloszlását mutatja a csillagkeletkezési ráta kontúrjaival. Az alsó sorban a gáz felületi sűrűség kontúrokon a különböző korú csillagok eloszlása jelenik meg a következő színekkel: kék $\tau < 15Mév$, zöld $15Mév < \tau < 50Mév$, piros $50Mév < \tau < 100Mév$.

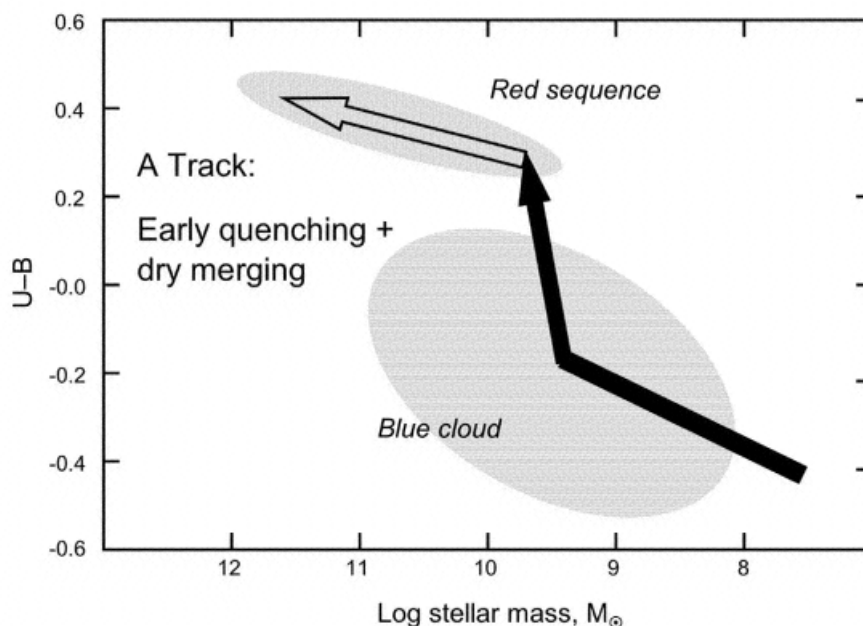
9.3. Galaxis ütközések és galaxis-fejlődés

A megfigyelések szerint a nagyobb vöröseltolódásoknál gyakoribbak a kölcsönható galaxisok. Sidney van den Bergh szerint (Van den Bergh 2001) már $z=0,8$ értéktől ki lehet mutatni ezt a különbséget. Az elméletek szerint a galaxis egyesülések (mergers) végül óriás elliptikus galaxisok kialakulásához vezetnek. A 8. fejezetben említett „kék”, vagy „korai típusú” galaxisokból a szín-szín és szín-fényesség diagramokon „vörös”, vagy késői típusúak lesznek.

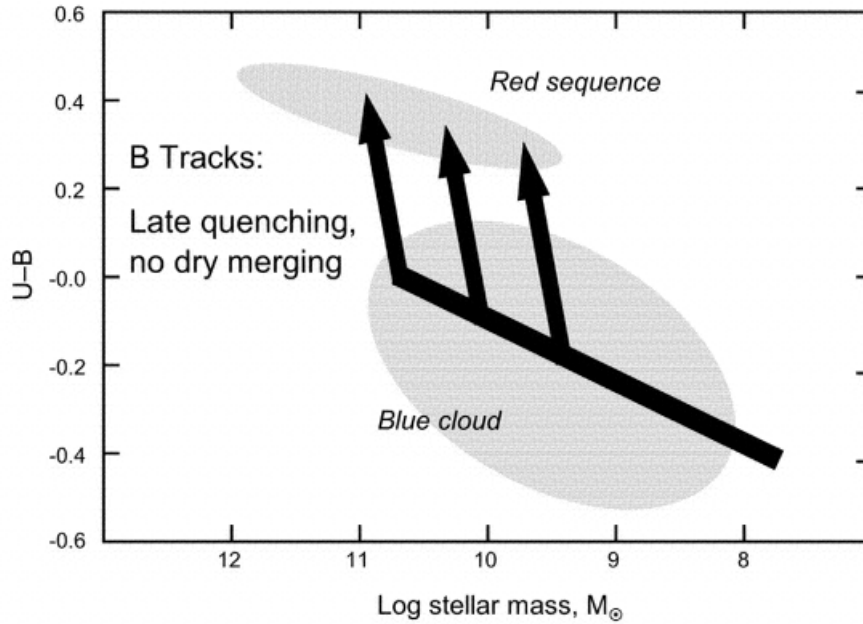
A kék felhőben irreguláris és spirálgalaxisok, a vörös sorozaton lentikulárisak és elliptikusak találhatók. Az egyik elmélet szerint az elliptikus állapotba egyszeri galaxis-összeolvadás vezet, a heves csillagkeletkezés elfogyasztja a csillagközi anyagot, majd leáll. A nyilakkal jelölt fejlődési sematikus utak abban különböznek, hogy inkább a spirálgalaxis vagy elliptikus galaxis állapotban történnek a galaxis egyesülések, melyek végül elvezetnek az óriás elliptikus állapotig (lásd 9.4. ábrák, Faber et al. 2007). A spirál galaxisok egyesülése úgynevezett *nedves* (wet merger) hideg gázban gazdag állapotban történik, az elliptikusoké lényegében gázmentes, *száraz* (dry merger). Ha hasonló tömegű spirálgalaxisok ütköznek, akkor a galaxis tömege nagyjából duplázódik, ezt a nyílak ferdesége jelzi. Elvileg lehetne a tömeg jelentős változása nélküli átalakulás is.

Amint a galaxis felkerült a vörös sorozatra, lassan, gáz mentes, azaz száraz egyesülésekkel növeli tömegét. A száraz egyesüléseket fehér nyílak jelzik, melyek nem vízszintesek jelezve ezzel, hogy a csillag populáció öregszik, a galaxis színe egyre vörösebb lesz.

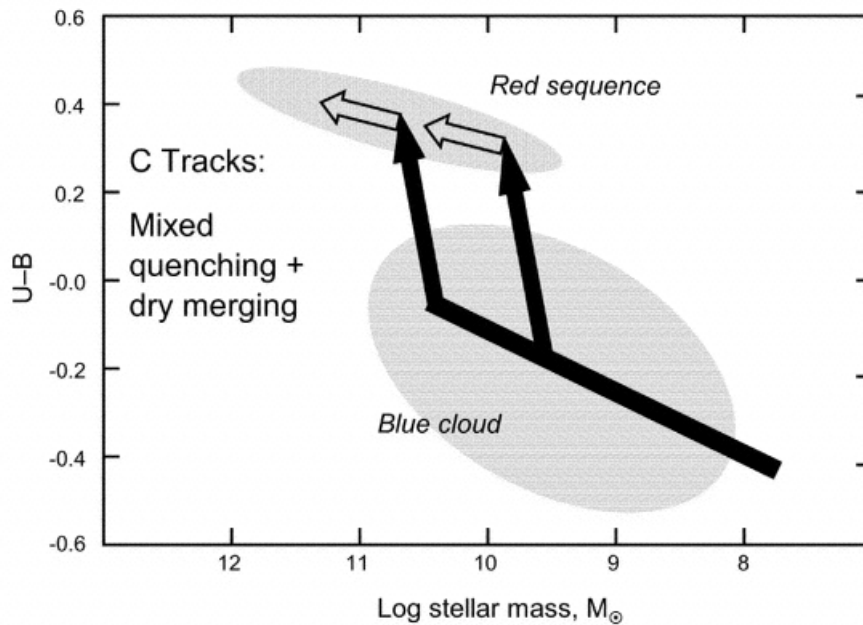
A fejlődési utak tehát a tömeg-gyapodás (mass assembly) és a csillagkeletkezés leállása (quenching), mint fő folyamatok időskálájától függenek. A három lehetséges utat 3 tömeg-szín diagram mutatja be. Az „A” és „B” mód a két véglet, a csak nedves és csak száraz egyesülésekkel. A „C” kevert modell illeszkedik legjobban az elliptikus galaxisok megfigyelt paramétereire, ekkor egyesülés mindkét fő állapotban történhet. Lehet a felfelé vezető nyíl függőleges is, azaz a galaxis gáztartalmát valamely egyesülés nélküli folyamattal is elvesztheti. Ez utóbbi produkálhatja a korongos (disky) S0 galaxisokat (Faber et al. 2007).



9.4.a. ábra: „A” fejlődési modell – a csillagkeletkezés nagyon korán leáll, a tömeg-gyapodás száraz egyesülésekkel, kis fragmentumokból a vörös sorozaton történik (Faber et al 2007). Az U-B színindexet a teljes csillagtömeg logaritmusának függvényében ábrázoljuk.



9.4. b. ábra: „B” fejlődési modell – a csillagkeletkezés nagyon későn áll le, a tömeg-gyapodás kék galaxis állapotban nedves egyesülésekkel történik, a vörös sorozaton pedig nincs további összeolvadás (Faber et al. 2007).



9.4. c. ábra: „C” fejlődési modell – „kevert modell”, egyesülés mindkét fő állapotban történhet. Ez a megfigyelt állapotokhoz legjobban illeszkedő modell. Lehet a felfelé vezető nyíl függőleges is, ha a galaxis gáztartalmát

valamely egyesülés nélküli folyamattal veszi el. Ez utóbbi produkálhatja a korongos (disky) S0 galaxisokat (Faber et al. 2007).

9.4. Csillagontó (starburst) galaxisok

9.4.1. Csillagkeletkezési ráta, csillagontó galaxisok

A csillagkeletkezés eredményezi a galaxisok és ezen keresztül az Univerzum kémiai összetételének változását, mert az adott fémességű csillagközi anyag a fúzióra képes „csillag” állapotba kerül. A csillagkeletkezési ráta (SFR, star forming rate) tág határok között változik a galaxisokban: 10^{-4} naptömeg/év $< \text{SFR} \leq 10^3$ naptömeg/év. A normál csillagkeletkezést mutató galaxisokban a csillagkeletkezési ráta csak néhány naptömeg/év. A nagyon heves csillagkeletkezés állapotában lévő galaxisok viszont átlagosan akár 1000 naptömegnyi csillagot formálnak évente. Ez utóbbiak 3 alosztályát különítjük el a csillagkeletkezési ráta szerint:

- **csillagontó (SB, star burst):** néhány naptömeg/év $< \text{SFR} \leq 50$ naptömeg/év
- **nagy infravörös luminozitású (LIRG, luminous infrared galaxy):** 50 naptömeg/év $< \text{SFR} \leq$ néhány 100 naptömeg/év
- **különösen nagy infravörös luminozitású (ULIRG, luminous infrared galaxy):** néhány 100 naptömeg/év $< \text{SFR}$.

A csillagkeletkezés elsődleges előfordulási helye szerint lehet

- a korongban (disk SF)– normál csillagkeletkezés
- a nukleusz közelében (circumnuclear SF) – a normál és csillagontó csillagkeletkezésnél is



9.6. ábra: Az NGC 6217 (R)SB(rs)bc morfológiai osztályú csillagontó galaxis. A képen a HII zónák dominálnak. A különleges galaxisok Arp katalógusában a 185-ös, a vékony filamenteket mutató alosztályban találjuk. Ugyanakkor fényes nukleusza és keskeny emissziós vonalai alapján Seyfert 2 osztályú.

9.4.2. A csillagkeletkezési aktivitás mérése

9.4.2.1. Ultraibolya fluxus

Az ultraibolya luminozitás elsősorban a nagytömegű fiatal csillagoktól és az általuk ionizált hidrogén felhőktől ered. A B0-nál forróbb színképosztályú csillagoknak van nem elhanyagolható ionizáló sugárzása ($\lambda < 91,2\text{nm}$). Ezek körül találjuk a HII zónákat.

9.4.2.2. $H\alpha$ fluxus

A forró csillagok környezetében ionizált gázban folyamatos hidrogén rekombináció zajlik (az elektronok szabadkötött energia-átmenete). A rekombinálódott atomok több-kevesebb lépcsőben a gerjesztetlen elektron sajátállapotokba jutnak. Átlagosan minden negyedik rekombinációkor $H\alpha$ (hidrogén Balmer alfa) foton szabadul fel (második gerjesztett és első gerjesztett elektron energia állapot közötti átmenet). Ez jelentős sugárzást eredményez a $H\alpha$ vonalon, mely a HII zónák vörös derengését okozza. A luminozitás arányos az ionizációs rátával.

9.4.2.3. Szabad-szabad rádió fluxus

Az ionizált gázban az elektronok szabad-szabad energia-átmenetei az un. fékezési sugárzást eredményezik. A luminozitás az elektronsűrűség négyzetével és a térfogattal arányos.

9.4.2.4. Távoli infravörös fluxus

A csillagközi por hatékonyan elnyeli a látható, és különösen hatékonyan az ultraibolya sugárzást. Ezt azután elsősorban távoli infravörös hullámsávban ($20\mu\text{m} < \lambda < 250\mu\text{m}$) kisugározzák a por, mint szilárd testek $T_{\text{por}} < 30\text{K}$ hőmérsékletének megfelelően.

9.4.2.5. Szinkrotron fluxus

Valójában az elektronsűrűség és mágneses térerősség függvényében lesz jelentős. Az elektronsűrűség megnövekedése a nagytömegű fiatal csillagok ultraibolya sugárzása miatti ionizáció következménye, ezért nyomjelzője ez a csillagkeletkezésnek.

9.4.2.6. CO 2,6mm-es és HI 21cm-es fluxus

A CO molekulák a hidrogén molekulákkal való ütközésekkel gerjesztve kerülnek nem nyugalmi forgási állapotokba. A tipikus sűrűség és hőmérsékletek mellett alapvetően az első gerjesztett forgási állapot lesz populált, onnan a $J=1-0$ átmenettel kb. 115GHz frekvenciájú (2,6mm hullámhosszú) sugárzást kibocsátva kerülnek alapállapotba. A CO jelenléte sűrű és hideg csillagközi gázt jelent, ami a csillagkeletkezés színtere. A mért 2,6mm-es fluxusból erre következtetve állítjuk, hogy az adott galaxisban adott a csillagkeletkezés feltétele.

A HI 21cm-es emisszió szintén mérési evidencia jelentős mennyiségű csillagközi gáz jelenlétére.

9.4.3. Törpe csillagontó galaxisok – HII galaxisok

A törpe csillagontó galaxisok (dwarf starburst), vagy más néven HII galaxisok tipikusan alacsony fémtartalmú, nagy semleges hidrogén tartalmú, alacsony por tartalmú, de magas csillagkeletkezési rátát mutató galaxisok. A csillagkeletkezési aktivitást emissziós spektrumuk is jelzi.

http://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/multimedia/ero/ero_ngc6217.html

Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:

Luntilla K.S.J. et al 2013: „*Constrained simulations of the Antennae galaxies: comparison with Herschel-PACS observations*”, [2013MNRAS.434..696K](https://arxiv.org/abs/2013MNRAS.434..696K)

Springel V., 2005: „*The cosmological simulation code GADGET-2*”, MNRAS, 364, 1105,
<http://www.mpa-garching.mpg.de/gadget/>

Stuck, C. 1999: „*Galaxy collisions*”, Physics Reports, 321, 1,
http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Struck/St_contents.html

Yun, M.S. et al. 1994: „*A High-Resolution Image of Atomic Hydrogen in the M81 Group of Galaxies*”, Nature, 372, 530

Yun, M.S. 1997: „*Tidal Interactions in M81 Group*”, in the Proceedings of IAU Symposium 186: Galaxy Interactions at Low and High Redshift, ed. D. Sanders

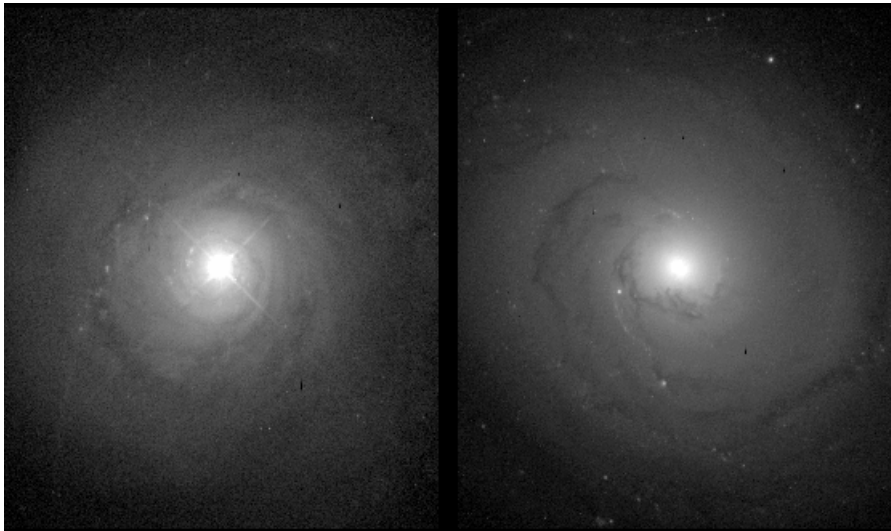
Van Den Bergh, S. 2001: „*The evolution of galaxy morphology for galaxies in the canada-france redshift survey*”, AJ, 122, 621.

10. fejezet - Aktív magú galaxisok, kvazárok

Az aktív magú galaxisok egyesített elmélete vázlatos tárgyalása és ennek tudományos előzményei.

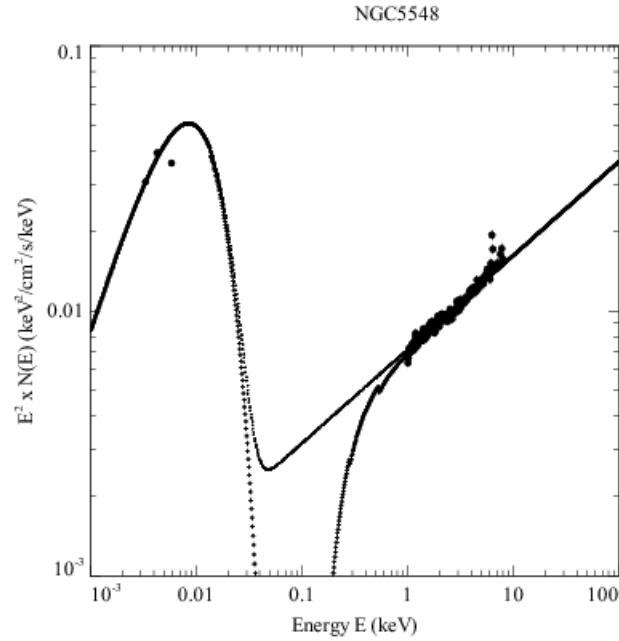
10.1. Seyfert galaxisok

A galaxisok néhány százaléka (lásd például Martini 2013) optikai (és sokszor röntgen) képe pontszerű, fényes "magot" tartalmaz, amely jóval fényesebb, mint a galaxis más részei. Ezeket „*aktív galaxismag*”-oknak, vagy aktív galaxis nukleusz-oknak hívjuk. Az aktív galaxismag a szakirodalomban szokásos rövidítéssel AGN (angolul Active Galactic Nucleus, többes száma Active Galactic Nuclei). Az NGC5548 egy nem távoli galaxis $z=0.017175$ vöröseltolódással. Különlegességét fényes nukleusza és széles, erős emissziós vonalakat mutató spektruma adja (lásd 10.1. és 10.2. ábra). Az ilyen galaxisokra Carl K. Seyfert (1943) hívta fel a figyelmet, megmutatva, hogy átmeneti spirál típusok planetáris ködökhöz hasonló emissziós spektrummal rendelkezhetnek.

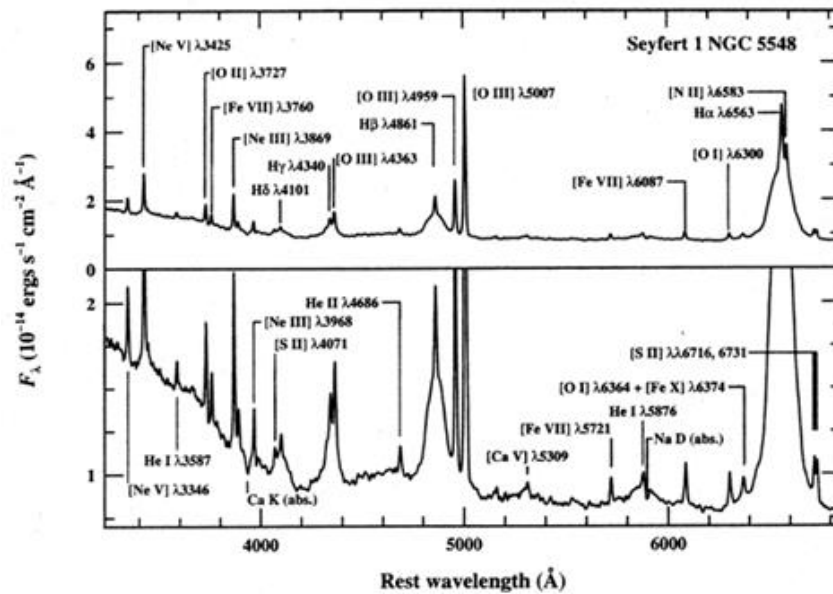


10.1. ábra: Az NGC5548 (R')SA0/a(s) morfológiai osztályú, Seyfert 1 típusú, aktív maggal rendelkező galaxis (bal) és az NGC3277 SA(r)ab morfológiai típusú (jobb) galaxis, hasonló távolságra és felbontásra helyezve. (Keel 2002, <http://www.astr.ua.edu/gifimages/ngc5548.html>)

Az aktív galaxismag luminozitásának nagyobb része nem termális, spektrális energia eloszlása egy része hatványfüggvénnyel írható le (lásd 10.2. ábra). Az AGN-ek többsége erős emissziós vonalakat is mutat. Az elliptikus és lencés (csillagkeletkezés nélküli) galaxisok optikai spektrumában elnyelési vonalakat találunk. A spirális és irreguláris (csillagkeletkezést mutató) galaxisok alapvetően abszorpciós színekében $H\alpha$ emissziós vonal is látszik. Az AGN-ek spektrumában a $H\alpha$ emissziós vonal viszont többször erősebb, és C, Mg, O, N emissziós vonalak is feltűnnek (lásd 10.3. ábra).



10.2. ábra: Az NGC 5548 Seyfert 1 típusú galaxis SED-je (Vasudevan, R.V. & Fabian 2008).



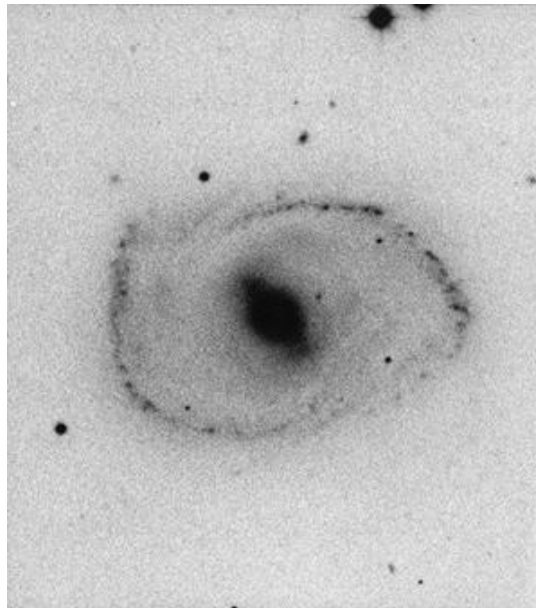
10.3. ábra: Az NGC 1275 Seyfert 1 típusú galaxis optikai spektruma az alsó panelen a fluxus skála más, hogy a gyengébb vonalak is láthatóvá váljanak. A széles profilú komponensre $\Delta v_{BL} \approx 5900 \text{ km/s}$, a keskeny vonalúra $\Delta v_{NL} \approx 400 \text{ km/s}$ (Filippenko, Peterson, NED, http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Glossary/Essay_seyfert.html).

- A Seyfert galaxisoknál a korong és a spirálkarok is látszanak a fényes nukleusz mellett. Két alosztályukat különböztetjük meg, az Sy1 és Sy2-t. Emissziós spektrumuk alapján egy harmadik rokon osztályt is itt említünk, az un. *LINER*-eket. A felosztás a kontinuum és a spektrumvonalak alapján történik. Egyrészt azt figyeljük, hogy milyen emissziós vonalak tűnnek fel, másrészt ezek Δv vonalszélességét, amia vonal teljes szélessége a maximum felénél (FWHM, full width at half maximum).

Seyfert 1 galaxisok spektrumának jellemzői (lásd 10.2. ábra):

- erős kontinuum az infravöröstől a röntgen tartományig

- széles megengedett emissziós vonalak (HI, HeI, HeII, $\Delta v \approx 1000 \text{ km/s}$)
- keskeny tiltott emissziós vonalak: OIII, NII, SII, $\Delta v \leq 500 \text{ km/s}$



10.4. ábra: Az NGC 1358 SAB(r)0/a Seyfert 2 típusú galaxis fotografikus képe (103aO lemezre, NED).

Seyfert 2 galaxisokra jellemző spektrum sajátosságai (lásd 10.11. ábra):

- gyenge kontinuum, előállítható alapvetően csillag SED-ek összegeként
- keskeny megengedett és tiltott emissziós vonalak ($\Delta v \leq 500 \text{ km/s}$)

Seyfert 1.2, 1.5, 1.8 és 1.9 galaxisok (Osterbrock 1981)

- A Sy1 és Sy2 osztályok közötti átmenetek, az 1.9-től 1.2 felé növekvő H α és H β vonalszélesség
- 1.5: hasonló erősségű H α és H β vonalak
- 1.8: a H α vonalhoz képest gyenge, de széles H β vonal
- 1.9: csak a H α emissziós vonal széles

A széles vonalak (például H, HeII) vonalszélessége 10000 km s^{-1} -t is elérheti. Ezek a vonalak nagy sűrűségű $n_e \geq 10^9 \text{ cm}^{-3}$ közegből származnak. A keskeny vonalak viszonylag alacsonyabb sűrűségű $10^3 \text{ cm}^{-3} \leq n_e \leq 10^6 \text{ cm}^{-3}$ közegben keletkeznek.

10.2 LINER-ek

A LINER-ek (Low-Ionization Nuclear Emission-Line Regions) galaxismagok alacsony ionizációs fokú emissziós vonalakkal. Az ionizáltságot a különböző ionizációs fokú oxigén vonalak relatív erősségével jellemezzük. A közeli óriásgalaxisok több mint fele LINER aktivitást mutat.

- a Seyfert 2 típus halványabb változata (lásd 10.5. ábra),
- $F([\text{OIII}] 500,7\text{nm}) / F([\text{OII}] 372,7\text{nm}) \leq 1$ és $F([\text{OIII}] 500,7\text{nm}) / F([\text{OI}] 630,7\text{nm}) \leq 1/3$
- az aktivitás a nukleusz környékén van

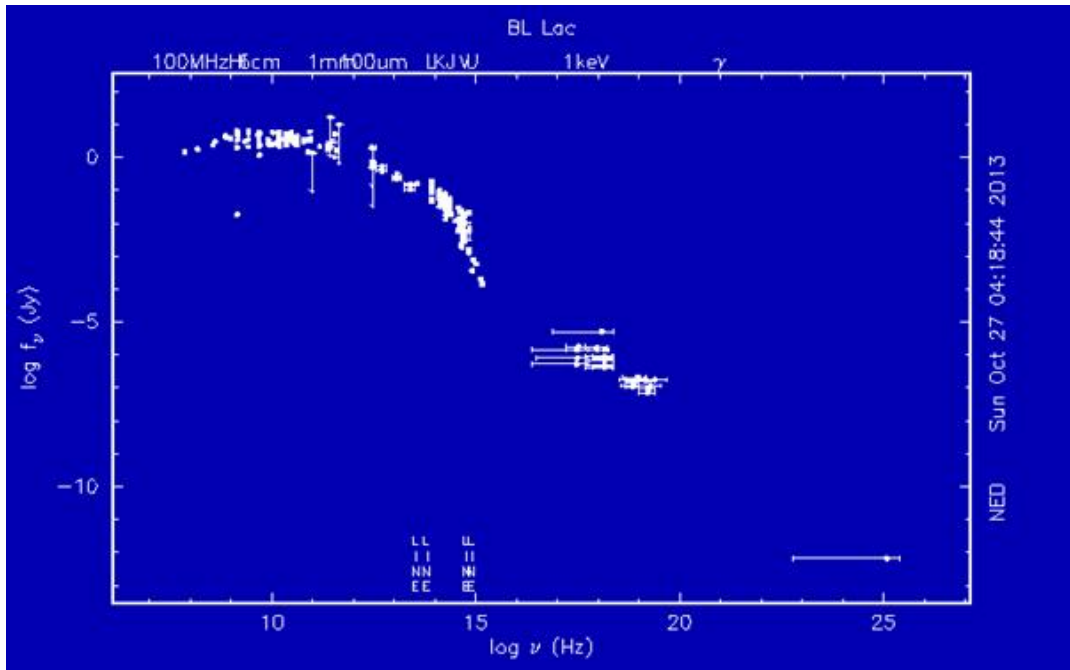
- a spektrumvonalak a Seyfert 2 és normál spirál közötti átmenetet mutatnak (példa spektrum a 10.11. ábrán).



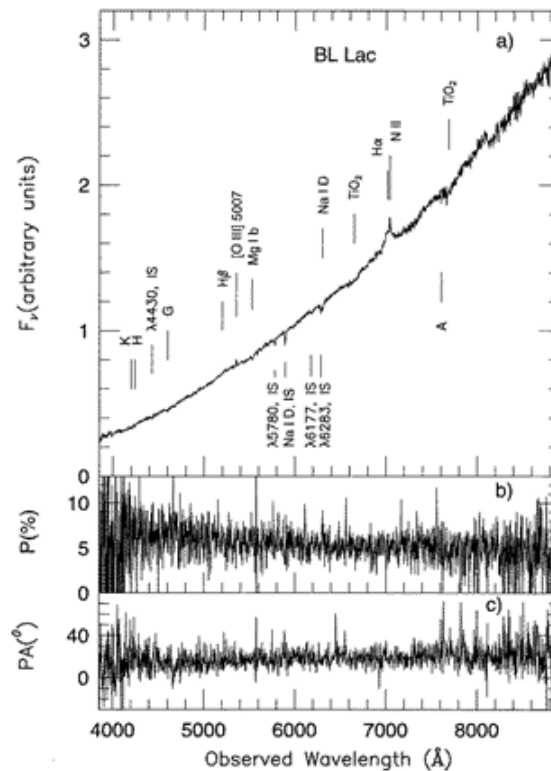
10.5. ábra: Az NGC 1052-es E4 morfológiai osztályú LINER (NED)

10.3. BL Lac - blazárok

Gyenge emissziós vonalat mutató pontszerű (csillagszerű) források a teljes elektromágneses spektrumban (a rádiótól a gamma tartományig) mérhető sugárzással (lásd 10.6. ábra). Jelentős kontinuum és spektrális változásokat mutatnak, igen rövid időskálával (OVV, azaz Optical Violently Variable). Az emissziós vonalak legjobban a „nyugalmi” periódusban látszanak. A kontinuumban dominál a szinkrotron sugárzás. Jellemző még a kb 5%-ban lineárisan polarizált sugárzás. A 3c273 is egy blazár jelentős gamma sugárzással, de spektrumában látunk emissziós vonalakat is, és kompakt jet-jét is megfigyelték. A jet kis szögben hajlik a látóirányhoz. Jellemző blazár spektrumot a 10.6. b) és 10.11. ábrán mutatunk. A BL Lacerte-t kezdetben pár napos időskálán szabálytalanul változó csillagként azonosítottak. John L. Schmitt (1968) mérései nyomán lett egy új osztály névadója, de erős spektrális változásai során van olyan állapota, amikor talán nem is a legjobb mintapéldánya osztályának, mert Vermeulen et al. (1995) a vonalszélességre a korábbinál nagyobb értéket kapott $FWHM(H\alpha) = 5.6 \pm 1.4 \text{ \AA}$. Ezzel azonban még az 5 Å-ös határon van.



10.6. a) ábra: A BL Lac spektrális energia eloszlás diagramja a rádiótól a gamma tartományig hibavektorokkal. A felső tengelyen a hullámhossz tartomány megjelölése alul a frekvencia (készült az NED SED rajzoló rutinjával).



10.6. b) ábra: A BL Lac spektruma és polarizáltsága (P relatív lineáris polarizáció, PA pozíciószöggel megadva). Jellemző, hogy csak nagyon gyenge vonalakat látunk. (Vermuelen 1995).

10.4. Rádió hangos AGN

Sok aktív maggal rendelkező galaxist eredetileg, mint fényes rádióforrást azonosítottak (akár 10^{39} W rádió luminozitással a 10MHz-100GHz frekvenciatartományban). Ezek közül voltak olyanok, ahol a galaxis is látszott,

mint kiterjedt forrás a látható tartományú felvételeken, és voltak pontszerűek, azaz csillagszerű megjelenésűek. Ez utóbbiakkal a következő fejezet foglalkozik (rádió-hangos kvazárok).

10.4.1. A BLRG és NLRG osztályok

A **rádiógalaxisok** erős rádióforrások melyek óriás elliptikus galaxisokkal asszociáltak. Két csoportjuk optikai spektrumuk alapján:

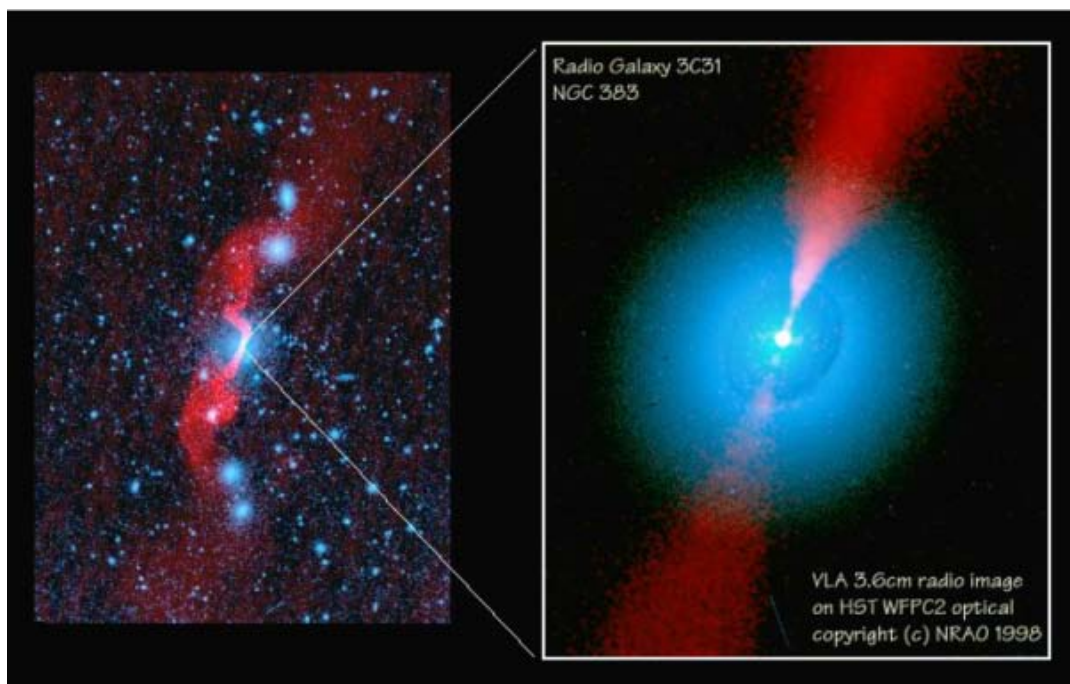
- **BLRG:** (*bright line radio galaxy*) széles vonalakat mutató rádiógalaxis, optikai spektruma nagyon hasonló a Sy1-hez, de még szélesebb vonalprofilokkal
- **NLRG:** (*narrow line radio galaxy*) keskeny vonalakat mutató rádiógalaxis, hasonló a Sy2-höz

A BLRG és NLRG minta spektrumokat lásd a 10.11. ábrán.

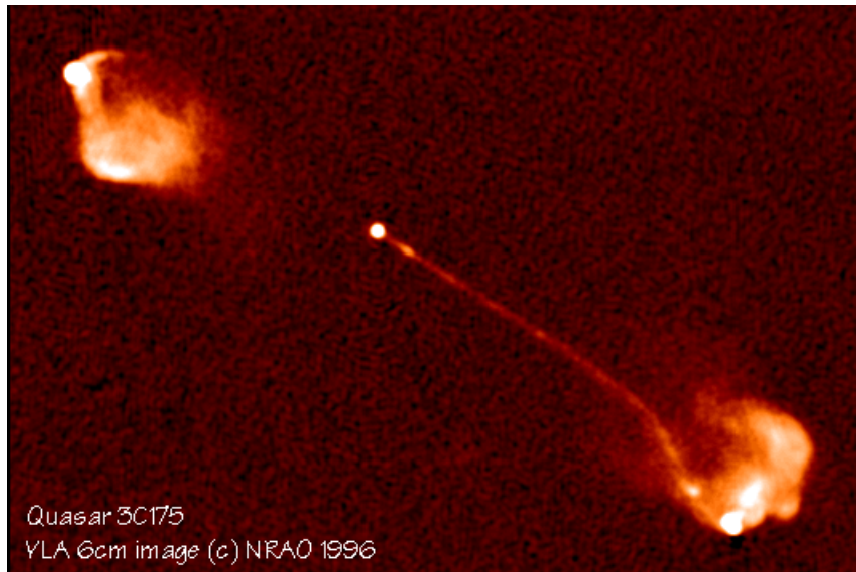
Spektrális index: $\alpha_{1\text{GHz}}$ a SED meredeksége a rádió tartományban, 1GHz frekvenciánál. A meredek (steep) és lapos (flat) kategóriáknak megfelelő meredekségek közti határ az $\alpha_{1\text{GHz}} = -0,4$.

10.4.2. Az NLRG alosztályai az FRI és FRII típusok:

A rádiógalaxisok nagyfelbontású (rádió interferometriai) vizsgálata alapján a rádió fényes tartomány a galaxis nukleuszában van, de onnan a galaxis optikai méretét meghaladó nyalábok (angolul lobes) indulhatnak ki. A nyalábokat kétpólusú, nagysebességű (gyakran relativisztikus) kiáramlásokként úgynevezett rádió *jet*-ekként határozták meg (lásd 10.7. ábra). Bernard Fanaroff és Julia Riley (1974) a rádiógalaxisokat a nagy skálájú rádió emisszió morfológiája alapján két osztályba sorolta. Az FRI (Fanaroff-Riley type I) források rádió tartományban fényesebbek a nukleuszuk irányában, míg az FRII források a rádió fényesebbek a nyalábjaikban.



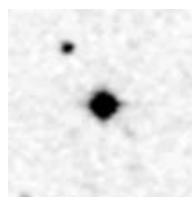
10.7. a) **ábra:** Az NGC383 (3c31) FRI típusú rádió galaxis kompozit képe. Kék: optikai, vörös: rádió (Bridle et al. 1998)



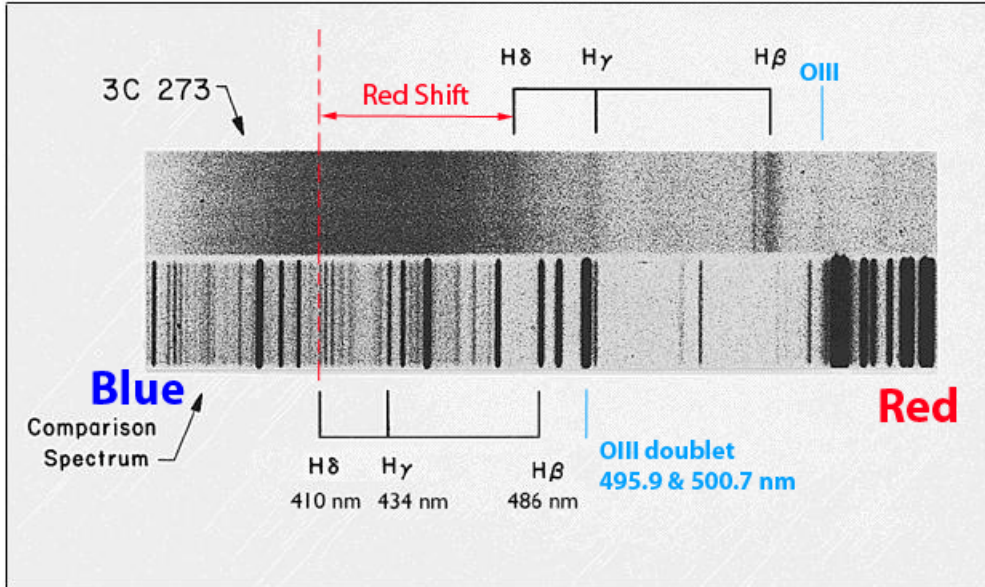
10.7. b) ábra: A 3C 175 FRII típusú rádió galaxis 0,35 ívmásodperc felbontású képe 4,9GHz frekvencián a VLA-val (NRAO, Bridle et al. 1996).

10.5. Kvazárok

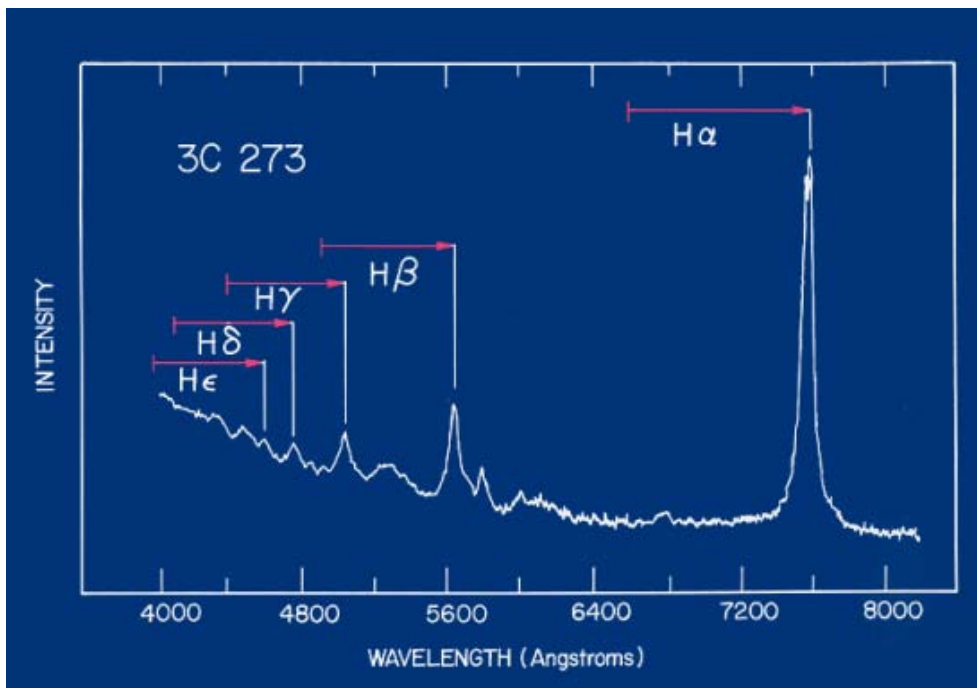
A közeli galaxisok rádió sugárzásának mérése után teljes égbolt felmérésekben kerestek pontszerű rádióforrásokat. Az egyik ilyen felmérést a Cavendish Laboratory (University of Cambridge) végezte Martin Ryle vezetésével. Katalógusaik objektumaira C kezdőbetűvel és sorszámmal hivatkoznak. A harmadik Cambridge-i rádió kontinuum pontforrás katalógus (159 MHz és 178 MHz frekvenciákon) egyik forrása a 3c273. Ez a látható tartományban egy 12.8 magnitúdós csillagszerű objektumnak mutatkozott. Ez egyébként egyike volt a „különös kék csillag”-ként számon tartott forrásoknak. Erre a forrásra Maarten Schmidt (Schmidt 1963) egy széles H Balmer emissziós vonalakat mutató spektrumot mért, melyből $z = 0,158$ vöröseltolódást kapott. Ez akkor még különösen nagy távolsági sebességnek számított. A csillagszerű rádióforrás mellett látható tartományban egy jet is látszott. A források természetére kezdetben csak találgatások voltak, elnevezésük változott QSO (quasi-stellar object, azaz csillagszerű objektum), QRS (quasi-stellar radio source, azaz csillagszerű rádió forrás), majd végül quasar, (ezt magyarosan ejtve) kvazár lett.



10.9. ábra: Egy csillag (bal fent) a 3c273 kvazár (középen) és a 3c273 kvazár jet-je (jobbra lefelé mutat). (NED, DSS 1994)



10.10. a) ábra: A 3c273 kvazár spektruma M. Schmidt méréseiből (Sarkissian 2013).



10.10. b) ábra: A 3c273 kvazár spektruma erős hidrogén Balmer emissziós vonalakkal, mellette az ábrán nem megjelölt kétszeresen ionizált oxigén vonalak is feltűnnek. A piros nyilak jelzik a spektrumvonalak eltolódását, ami a H α vonalra $\Delta\lambda \approx 103,7\text{\AA}$ (Keel, 2002).

A 3c273 kvazár z vöröseltolódása és v távolodási sebessége a Speciális Relativitáselmélet szerint a H α vonal $\lambda_{\text{nyugalmi}}$ és $\lambda_{\text{mért}}$ nyugalmi és mért hullámhosszából:

$$z = \frac{\lambda_{\text{mért}} - \lambda_{\text{nyugalmi}}}{\lambda_{\text{nyugalmi}}} \approx \frac{760\text{nm} - 656,3\text{nm}}{656,3\text{nm}} = 0,158 \quad (10.1)$$

$$v = c \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1} \approx 2,998 \times 10^8 \frac{1,158^2 - 1}{1,158^2 + 1} [\text{kms}^{-1}] = 4,37 \times 10^4 \text{kms}^{-1} \quad (10.2)$$

A meghatározott távoldási sebességet használhatjuk a d távolság becslésére a Hubble formulával:

$$d = \frac{v}{H} = \frac{4,37 \times 10^4 \text{kms}^{-1}}{67,8 \times \text{kms}^{-1} \text{Mpc}^{-1}} = 645 \text{Mpc} \quad \text{azaz 2,11 milliárd fényév} \quad (10.3)$$

A 3c273 látszó fényessége $V=12,8$ magnitúdó. Távolságát felhasználva abszolút fényessége:

$$M_V = V - 5 \log \left(\frac{d}{10 \text{pc}} \right) = 12,8 - 5 \log \left(\frac{6,45 \times 10^8 \text{pc}}{10 \text{pc}} \right) = -26,25 \quad (10.4)$$

A Tejútrendszer integrális luminozitása $M_V = -20,5$. Az 5,75 magnitúdó különbségből a V sávban mutatott luminozitások aránya:

$$\frac{L_{V,3c273}}{L_{V,\text{Tejútrendszer}}} = 10^{0,4 \times 5,75} = 200 \quad (10.5)$$

Tehát a 3c273 a V sávban két nagyságrenddel nagyobb luminozitású, mint egy tipikus spirálgalaxis. A 3c273 teljes spektrumra vett fluxusa: $F_{\text{total}} = 1,9 \times 10^{-12} \text{Wm}^{-2} = 1,9 \times 10^{-9} \text{ergs}^{-1} \text{cm}^{-2}$ (Courvoisier 1998). Ebből a teljes luminozitása:

$$L_{3c273} = 4\pi d^2 F_{\text{total}} = 4\pi \left(6,45 \times 10^8 [\text{pc}] \times 3,09 \times 10^{16} \left[\frac{\text{m}}{\text{pc}} \right] \right)^2 1,9 \times 10^{-12} \text{Wm}^{-2} = 9,5 \times 10^{39} \text{W} \quad (10.6)$$

A Nap és a Tejútrendszer luminozitása:

$$L_{\text{Nap}} = 3,847 \times 10^{26} \text{Wm}^{-2} = 3,847 \times 10^{33} \text{ergs}^{-1} \quad (10.7)$$

$$L_{\text{Tejútrendszer}} = 10^{11} L_{\text{Nap}}$$

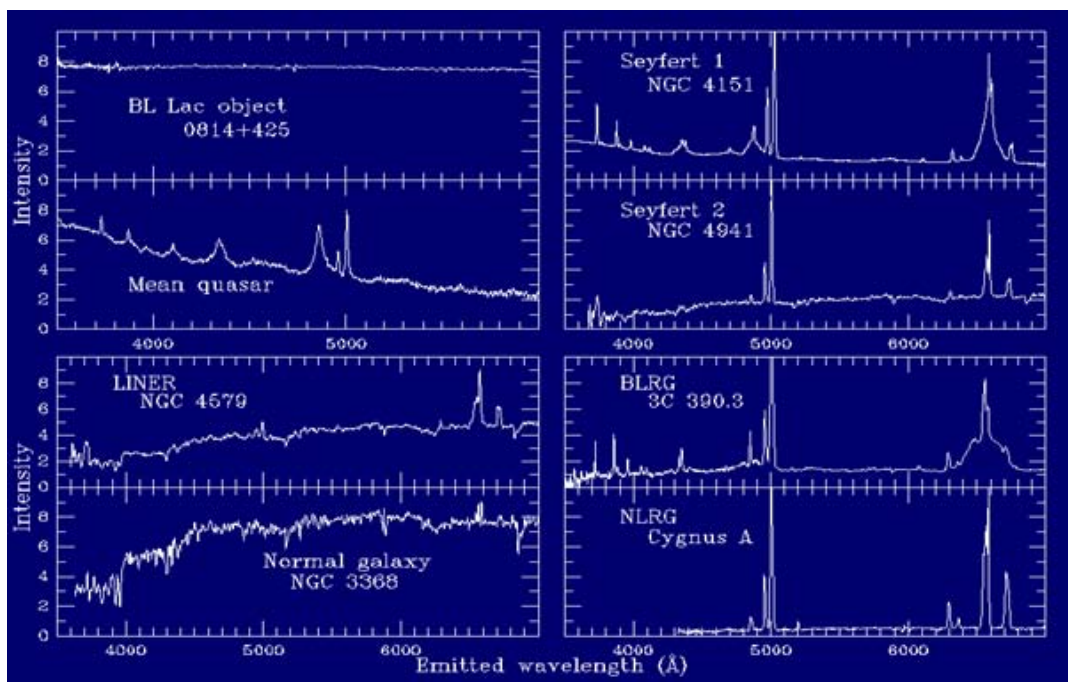
A 3c273 kvazár luminozitása Nap-luminozitás egységekben, illetve a Tejútrendszer luminozitásához hasonlítva:

$$L_{3c273} = \frac{9,5 \times 10^{39}}{3,847 \times 10^{26}} L_{\text{Nap}} = 2,47 \times 10^{13} L_{\text{Nap}} \approx 250 L_{\text{Tejútrendszer}} \quad (10.8)$$

10.6. Aktív galaxismaggal rendelkező rendszerek egyesített modellje

10.6.1. Az aktív galaxismaggal rendelkező objektumok spektrumai

A 10.11. ábrán összehasonlíthatjuk a z AGN-ek néhány fő típusa optikai spektrumait. A spektrumokat nyugalmi rendszerben (vöröseltolódásra korrigálva) közöljük. Figyeljük meg a hasonlóságot a kvazár, Sy1 és a BLRG spektruma között, a LINER és az NGC3368 spirálgalaxis spektruma között, illetve a Sy2 és NLRG spektruma között. A BL Lac objektum spektruma azonban mindtől eltérő.



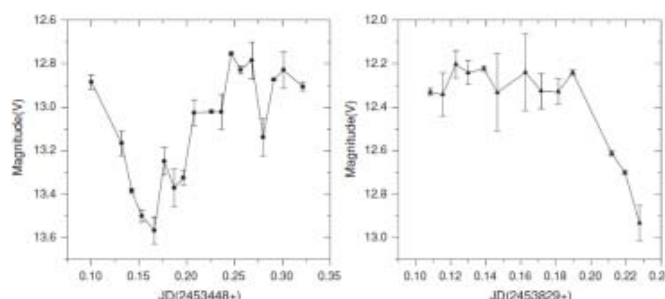
10.11. ábra: Aktív galaxismaggal rendelkező objektumok (látható tartományú) spektrumának összehasonlítása, és összevetés az NGC3368 spirálgalaxis spektrumával (Keel, 2002).

objektum	a galaxis morfológiai típusa	a rádió emisszió erőssége	emissziós vonalak	luminozitás	
				W	$L_{\text{Tejútrendszer}}$
blazár	elliptikus	erős	gyenge	$10^{38} - 10^{42}$	$10 - 10^5$
rádió-hangos kvazár	elliptikus	erős	széles	$10^{38} - 10^{42}$	$10 - 10^5$
rádiógalaxis	elliptikus	erős	keskeny	$10^{36} - 10^{38}$	0,1 – 10
rádió-csendes kvazár	spirális vagy elliptikus	gyenge	széles	$10^{38} - 10^{42}$	$10 - 10^5$
Sy1	spirálgalaxis	gyenge	széles	$10^{36} - 10^{38}$	0,1 – 10
Sy2	spirálgalaxis	gyenge	keskeny	$10^{36} - 10^{38}$	0,1 – 10

10.1. Táblázat: AGNelőfordulási hely, emisszió a rádió tartományban és optikai spektrális jellemzők.

10.6.2. Az aktív galaxismag mérete

Az energiatermelő zóna méretére becslést adhatunk a fényesség-változások karakterisztikus idejéből. A galaxismagok fényessége akár órák alatt is változhat olyan jelentősen, hogy a luminozitás változása összemérhető a luminozitással (lásd például a 10.12. ábra). Ez azt jelenti, hogy az energiaforrás mérete 60 fényperc, azaz 10^{12} m nagyságrendű lehet, ami nagyjából a Nap-Szaturnusz távolság. A 3c273-nak vannak 13 perces változásai is (Fan et al 2009).



10.12. ábra: A 3c273 kvazár fényességváltozása. Látszik, hogy 0,05nap (1,2 óra) alatt jelentős fényesség-változás történhet (Fan et al. 2009).

A feketelyukak nagyon kis térrészben jelentős tömeggel bíró objektumok. A feketelyuk R_S Schwarzschild sugara az M_{BH} tömegéből:

$$R_S = \frac{2GM_{BH}}{c^2} = 1,48 \times 10^{-27} M_{BH} [\text{mkg}^{-1}] \quad (10.9)$$

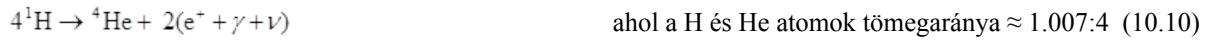
Ha $M_{BH} = 10^8 M_{\odot}$ akkor $R_S \approx 3 \times 10^{12} \text{ m}$ tehát az aktív galaxismagok méretüket tekintve lehetnek nagytömegű feketelyukak.

10.6.3. Az aktív galaxismag luminozitása és energiatermelése

Az aktív galaxismagok luminozitása túl magas ahhoz, hogy azt a csillagok belsejében lejátszódó magfúzióval fedezze. Ezt könnyen beláthatjuk. A 3c273 az egyik legfényesebb közeli kvazár teljes spektrális tartományra felösszegezett luminozitása $L_{3c273} \approx 9,5 \times 10^{39} \text{ W}$. Kérdés, hogyan lehet ekkora teljesítményt előállítani.

10.6.2.1. Energiatermelés fúzióval

A fősorozati csillagok belsejében zajló hidrogén fúzió:



A magreakció η_{nuci} hatékonysága kifejezhető az energiává alakult és a felhasznált nyugalmi tömegek arányával. Ez, az alfarészecske m_α és a proton m_p tömegét ismerve:

$$\eta_{nuci} = \frac{m_\alpha - 4m_p}{4m_p} = \frac{6.64424 \times 10^{-27} \text{ kg} - 4 \times 1.67262 \times 10^{-27} \text{ kg}}{4 \times 1.67262 \times 10^{-27} \text{ kg}} = 0,0069 \quad \text{azaz kb. 0,7\%} \quad (10.11)$$

Tegyük fel, hogy az AGN $L_{AGN} \approx 9,6 \times 10^{39} \text{ W}$ luminozitása csillagmagokban zajló nukleáris reakcióból származik.

Ha ezt az AGN $t = 10$ millió évig produkálja a (10.11) egyenlet szerinti η_{nuci} hatékonysággal, akkor ehhez ΔM_{nuci} nyugalmi tömeg átalakulására van szükség, melyet az $E=mc^2$ törvény alkalmazásával kiszámíthatunk:

$$\Delta M_{nuci} = \frac{1}{\eta_{nuci}} \frac{t \times L_{AGN}}{c^2} = \frac{3,16 \times 10^{14} \text{ s} \times 9,6 \times 10^{39} \text{ kgm s}^{-3}}{0,0069 \times 8,99 \times 10^{16} \text{ ms}^{-2}} \approx 4,9 \times 10^{39} \text{ kg} \approx 2,5 \times 10^9 M_{\odot} \quad (10.12)$$

Ez túl nagy tömeg, ezért nagyobb hatásfokú energiatermelést kell találnunk.

10.6.2.2. Energiatermelés akkrécióval

Tegyük fel, hogy az AGN sugárzási energiája az M központi tömeg gravitációs potenciál gödrébe szabadeséssel,

v_{ff} sebességgel, és $\frac{dm}{dt}$ rátával behulló tömeg mozgási energiájából származik. Ekkor az L_{acc} mechanikai luminozitás a mozgási energia megváltozásának rátája, melyet az egyéb energiavesztéseket elhanyagolva a potenciális energia megváltozása rátájával egyenlőnek veszünk:

$$L_{acc} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v_{ff}^2 = \frac{GM}{R} \frac{dm}{dt} = \frac{GM}{c^2 R} \frac{dm}{dt} c^2 \quad (10.13)$$

Vezessük be az η_{acc} akkréciós tömeg-energia átalakítási hatékonyságot, (10.13)-ból:

$$\eta_{acc} = \frac{GM}{c^2 R} \text{ és } L_{acc} = \eta_{acc} \frac{dm}{dt} c^2 \quad (10.14)$$

Vegyük észre, hogy

$$\eta_{acc} = \frac{R_S}{2R} \text{ mert } R_S = \frac{2GM}{c^2} \text{ a Schwarzschild sugár (lásd} \quad (10.15)$$

10.9. egyenlet).

Az akkréciós tömeg-energia átalakítási hatékonyság SI-ben:

$$\eta_{acc} = \frac{7,4 \times 10^{-26} M [\text{mkg}^{-1}]}{R [\text{m}]} \quad (10.16)$$

A hatékonyság lényegében attól függ majd, hogy a behullás a Schwarzschild sugár hányzorosáról történik. Feketelyuknál $R=3R_S$ 1/6-ot ad.

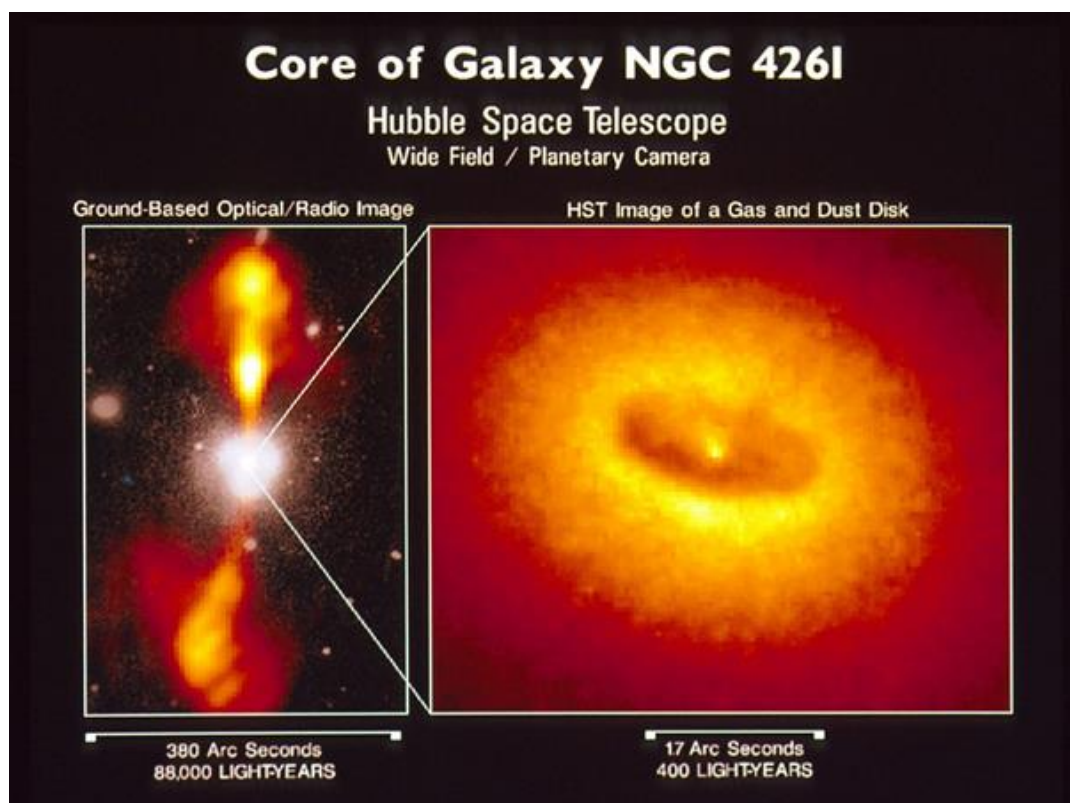
A hatékonyság feketelyukra történő behullásnál kb. 10%.

Ha a feketelyukra történő behullás 10% hatásfokkal alakítja a tömeget energiává, az 14,5-szer nagyobb a fúzióénál, tehát ez megfelelőbb megoldás a nagy luminositások problémájára.

10.6.4. Az aktív galaxismag működése

Mára számos észlelési bizonyíték van arra, hogy az aktív galaxismagokban szuper nagy tömegű $10^5 M_{N\odot} < M < 10^9 M_{N\odot}$ feketelyukakba hullik a környező galaxis anyag. Az AGN szerkezete a közvetlen megfigyelési evidenciákból (lásd pl. 10.13. ábra):

- anyaggyűjtő, vagy *akkréciós korong (accretion disk)* molekuláris, és atomos gázzal és porral, melynek külső pereme tóruszá szélesedik, erre történik a behullás a magot körülvevő térrészből
- kétpólusú kiáramlás a korongra nagyjából merőlegesen, a kiáramlás közepében, szűk nyalábban nagy sebességű, gyakran relativisztikus ($v \approx 0,1c$) sugárnyaláb (jet)
- a rendszer középpontjában szuper nagy tömegű feketelyuk, vagy kettős feketelyuk, magát a feketelyukat természetesen nem látjuk, de annak tömege a körülötte keringő anyag észlelt kinematikájából számítható



10.13. ábra: Az NGC4162 galaxis aktív magja
(http://www.astro.virginia.edu/class/whittle/astr553/Topic15/t15_ngc4261.jpg)

10.6.4.1 A központi szuper nagytömegű feketelyuk

A feketelyuk tömegét a körülötte keringő objektumok (például csillagok, vízgőz mézer emissziót mutató felhők) mozgásából számíthatjuk ki. A pályák fél nagytengelyei és keringési idők csak saját galaxisunk magjára ismeretesek,

melynek tömege ezekből $M_{BH} \approx 4,1 \times 10^6 M_{\odot}$ (Ghez et al. 2008). Az M31 magjában ennél 2 nagyságrenddel nagyobb (Bender et al. 2005), az M87 magjában pedig 3 nagyságrenddel nagyobb tömegű a feketelyuk. A gravitációs behullásnál a nyugalmi tömeghez tartozó energia 10%-a sugárzási energiává alakul, ami sokkal nagyobb, mint a nukleáris fúzió esetében. A tipikus AGN behullási rátája eléri az 1 naptömeget évente.

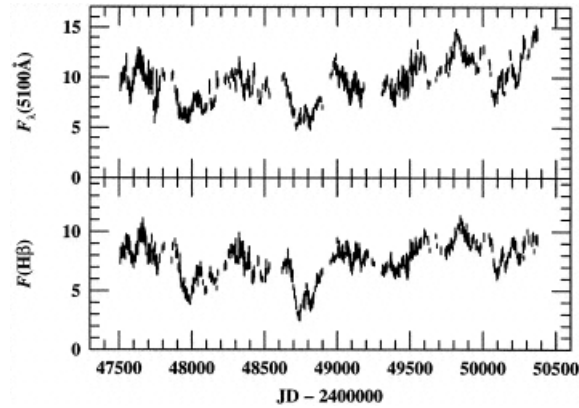
10.6.4.2 Akkréciós korong és tórusz

A gáz egy anyaggyűjtő (akkréciós) korongra hullik be spirál pályán, onnan kerül a feketelyukba. A korong mérete a központi feketelyuk R_S Schwarzschild sugarával $3R_S < R_{korong} < 10R_S$, sűrűsége: $n(H) \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. A korong külső szélé megvastagodott poros tóruszban folytatódik, mely elnyeli a korong belsőbb régióiból érkező ultraibolya sugárzást. A tórusz 1-100pc sugarú lehet, sűrűsége: $10^3 \text{ cm}^{-3} < n(H) < 10^6 \text{ cm}^{-3}$, porszemcséi $100K < T_{dust} < 1000K$ hőmérsékletének megfelelően az infravörös tartományban sugároz.

10.6.4.3 Gázfelhők a korong felett – BLR

A korong felett néhány ezer km/s pályamenti sebességgel ionizált gázfelhők keringenek. A foto-ionizáció forrása a korong ultraibolya sugárzása. A forró gázfelhőkből származnak az AGN spektrumában megjelenő a széles emissziós vonalak, ezért az általuk elfoglalt térrészt *széles vonalú régió*-nak (*broad line region*, BLR) hívjuk.

Sűrűségük: $n(H) \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. A felhőkből érkező látható tartományú kontinuum és H α , H β és egyéb rekombinációs emissziós vonalak fluxusainak jelentős változásai követik az ionizációs fluxus változásait.



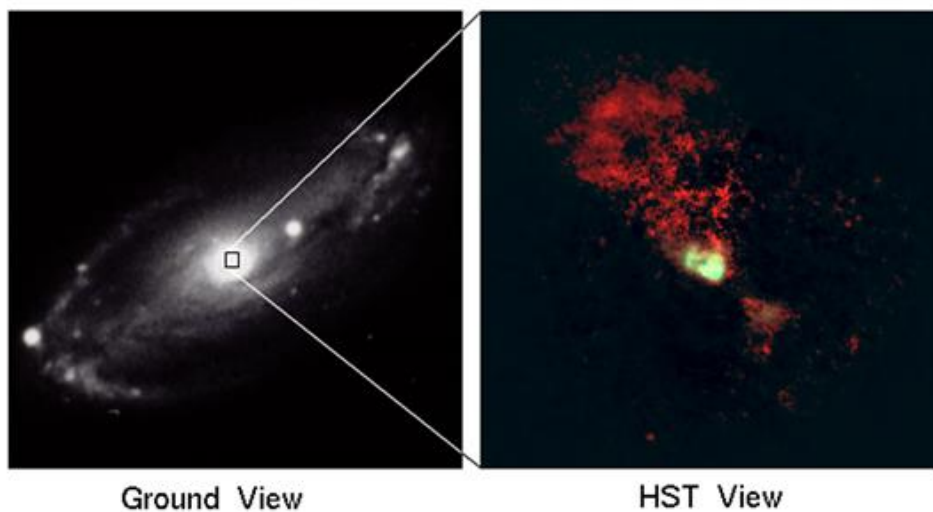
10.14. ábra: Az NGC5548 Sy1 galaxis magjának hidrogén Balmer β (10^{-13} ergs s^{-1} cm^{-2} egységekben) és 510nm-es kontinuum emissziója (10^{-15} ergs s^{-1} cm^{-2} \AA^{-1} egységekben) fénygörbéi 1989 decembertől 1996 novemberig (Peterson et al. 1999).

10.6.4.4 Relativisztikus sugárnyalábok – jets

A korongra merőlegesen a fénysebesség tizedét elérő erősen kollimált sugárnyalábok lövellnek ki. Ezek a feketelyuk közelében indulnak, kiterjedésük változó. Relativisztikus elektronjai szinkrotron sugárzását mérjük rádió tartományban. A sugárzás jelentősen polarizált, SED-je hatványfüggvény. A kisebb energiájúak a nukleuszhoz közel (FRI típus) a nagyobb energiájúak a jet végpontjaihoz közel (FRII) a legfényesebbek. A közel látóirányú relativisztikus sebességű AGN sugárnyalábok gyors morfológiai változásai (növekedése) látszólagosan fénysebességet meghaladó sebességeket jeleznek. A jet-ek közül a távolodó nem mindig látszik. Gyakran csomókat, illetve töréseket is látunk a jet-ekben. A modellek szerint az AGN tengelyében a kétpólusú sugárnyalábénál sokkal nagyobb nyílásszöggel egy kisebb sebességű kiáramlás is jelen van az úgynevezett *ionizációs kúp*-ban. Ez az a térrész, amit a poros tórusz nem árnyékol le a korong ionizáló sugárzása elől.

NGC 5728

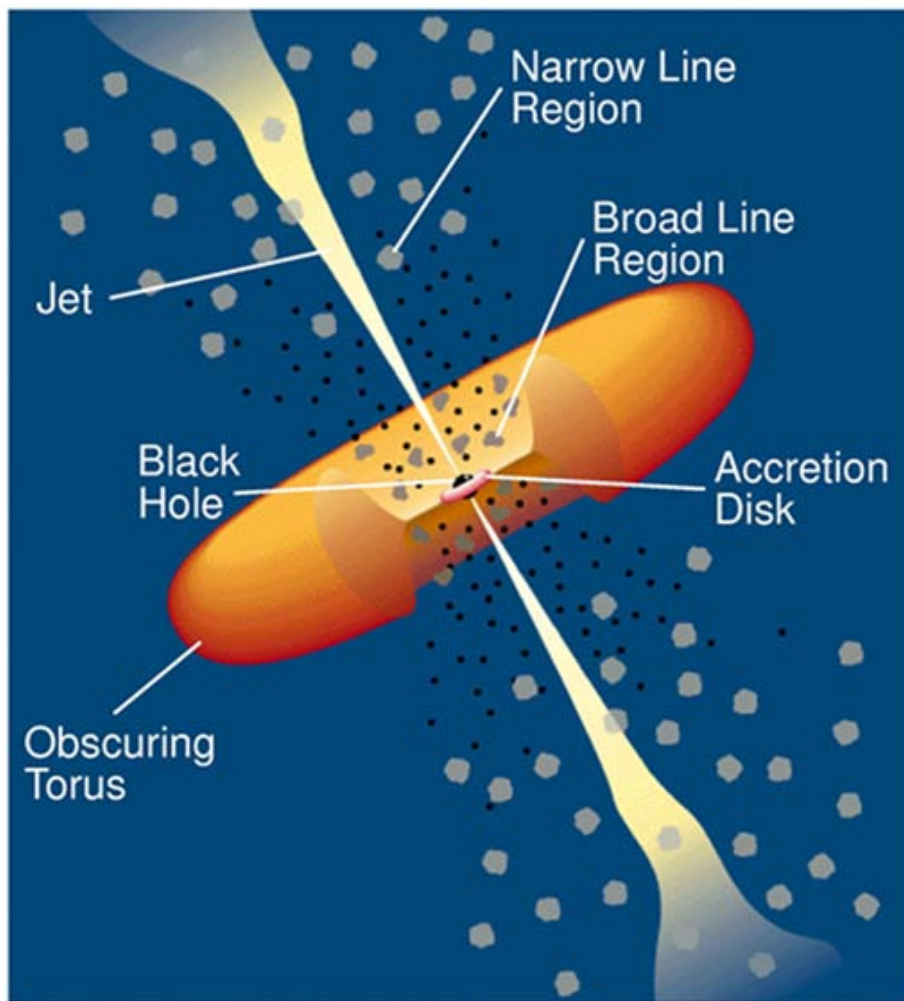
Hubble Space Telescope
Wide Field / Planetary Camera



10.16. ábra: Ionizációs kúp az NGC5728 Sy2 típusú aktív magú küllős spirálgalaxisban. A bal oldali képen a kontinuum a jobb oldalin a HST-vel az [OIII] és H α vonalak (zöld és vörös) emissziója. A rekombinációs vonalakon (jobboldali kép) feldereng az ionizációs kúp. Credit: Andrew S. Wilson (STScI)/NASA/ESA, James A. Braatz (Univ. Of Maryland), Timothy M. Heckman (STScI), Julian H. Krolik (JHU), George K. Miley (Leiden Observatory), and Allan Sandage (Carnegie Observatories).

10.6.4.3 Gázfelhők a korongtól távol – NLR

Az ionizációs kúpban központi feketelyuktól nagyjából 1kpc távolságban, azaz a kiáramlások által befolyásolt térrészben a központból „kiszökő” ultraibolya sugárzás még képes ionizálni a gázfelhőket. Ezeket pályamenti sebességeik (néhány száz km/s) és keskenyebb emissziós vonalaik megkülönböztetik a BLR felhőitől. Sűrűségük: $10^3 \text{ cm}^{-3} < n(H) < 10^5 \text{ cm}^{-3}$. Ezt tekintjük az AGN keskeny emissziós vonalai keletkezési helyének, ez az úgynevezett *keskeny vonalú régió* (narrow line region, NLR). Az egyéb galaktikus ionizált gázfelhőktől eltérő ionizáltsági állapotuk különbözteti meg az NLR felhőit.



10.16. ábra: Az AGN rendszer sematikus modellje, és fő részei. (Urry & Padovani 1996 <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/images/epo/gallery/agns/>)

Az AGN szerkezetét lásd még a következő animációban (Gomez 2012): http://www.iaa.es/~jlgomez/Jose_L._Gomez/Animations_files/agn_graph_040428_c4_1.avi

10.6.5. A látóirány szerepe a mérhető paraméterek alakulásában

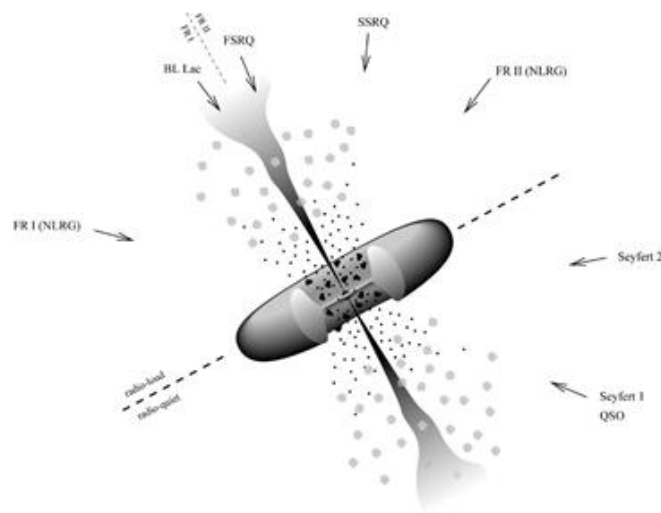
Az AGN-ek egyesített modellje (unified model) alapvetően a rálátás szögével (lásd 10.18. a ábra) magyarázza az AGN-ek SED-jében, spektrális jellemzőiben és fényváltozásaiban megfigyelt különbségeket, melyek alapján a fejezet elején kategóriákba osztottuk az AGN-eket. A rálátás szögétől függ ugyanis, hogy az AGN-ek a 10.6.4. alfejezetben felsorolt részeiből mit tud megfigyelni az észlelő (lásd 10.17. és 10.18. ábrák). Ha rálátunk az AGN belsőbb régióira, akkor ezek szabják majd meg mind a kontinuum alakját, mind a vonalprofilokat. Ha a „központi motor” (central engine) a poros tórusz takarásában van, akkor a befoglaló galaxis csillagfénye adja a kontinuumot, és az emissziós vonalak a NLR-ből származnak. Ugyanakkor a BLR sugárzása szóródhat a NLR felhőin, és ezt, mint polarizált sugárzást mérni is lehet – természetesen széles vonalprofilokkal. Abban az extrém esetben, amikor lényegében a jet tengelyében látunk rá az AGN-re, a SED-et a jet sugárzása határozza meg. SED maximumok a gamma és az infravörös tartományban, nagyon gyors változásokat mutat, és nem látunk erős emissziós vonalakat.

Az AGN luminozitása különben hasonló morfológia mellett lehet kisebb, vagy nagyobb a befoglaló galaxisénál. Előbbi esetben Sy1, utóbbiban kvazár vagy QSO típusú. A legkisebb AGN luminozitás (kisebb tömegű feketelyuk és alacsony behullási ráta) a LINER-eket jellemzi.

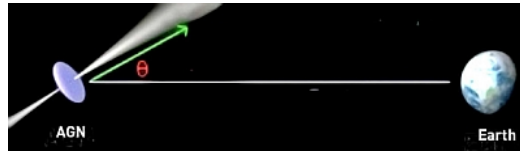
A központi feketelyuk tömege és a behullási ráta „aránya” is meghatározó. Egy kis tömegű feketelyukat nagy behullási rátával rádió-hangosnak, egy nagytömegű feketelyukat kis behullási rátával rádió-csendes AGN-nek észlelünk.

	rálátás iránya	
	lapjáról	éléről
rádió-hangos	Sy1	Sy2
	QSO	LIR Galaxy?
rádió-csendes	BL Lac	FRI
	BLRG	NLRG
	kvazár	FRII

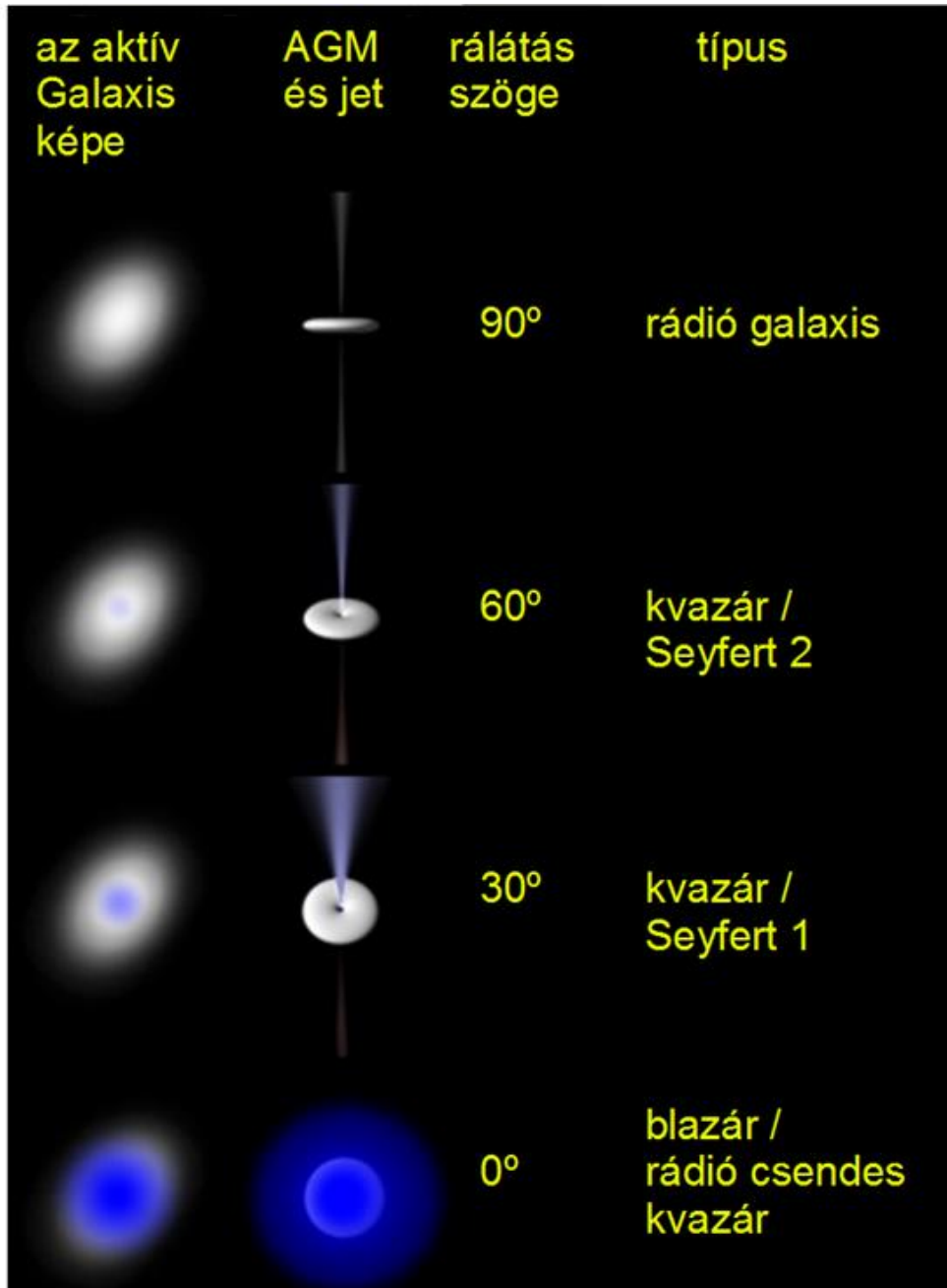
10.2. Táblázat: aktív galaxismagok különböző rálátással



10.17. ábra: A látószög függvényében ugyanazt a rendszert más és más AGN osztályba soroljuk (Torres & Anchordoqui 2004 alapján).



10.18. a) ábra: Aktív galaxismag és a rálátás θ szöge



10.18. b) ábra: Aktív galaxisok egyesített modellje (Kollgaard, R. 2004 felhasználásával).
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Galaxies_AGN_Jet_Properties-with-LoS.jpg

Az AGN a befoglaló galaxissal együtt fejlődik. Galaxis ütközéskor növekszik az akkréció-képes tömeg, kettős feketelyuk jöhet létre, illetve a központi feketelyukak is egyesülhetnek. Ez mind a feketelyuk tömegének növekedéséhez vezet.

Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:

- Abdo, A. A. et al. 2010:** „The spectral energy distribution of FERMI bright blazars”, *ApJ* 716, 30, doi:10.1088/0004-637X/716/1/30
- Bender, Ralf; et al. 2005:** „*HST STIS Spectroscopy of the Triple Nucleus of M31: Two Nested Disks in Keplerian Rotation around a Supermassive Black Hole*”, *The Astrophysical Journal* 631 (1): 280–300. arXiv:astro-ph/0509839.
- Bridle, A. H. et al. 1994:** „*Deep VLA Imaging of Twelve Extended 3CR Quasars*”, *The Astronomical Journal*, 108, 766-820
- Bridle, A. H. 1996:** <http://www.cv.nrao.edu/~abridle/images.htm>
- Combes F. 2000:** „*Fueling the AGN*”, http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Combes4/Combes_contents.html
- Courvoisier, T. J.-L. 1998:** „*The bright quasar 3c 273*”, [astro-ph/9809147](http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Courvoisier/Courvoisier_contents.html)
- Curran, S.J. 2000:** „*Seyfert galaxies: a review*”, PhD Thesis Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Curran/Curran_contents.html
- Fan et al. 2009:** „*Optical observations of 3c273 from 2000 to 2008*”, *AJ* 138, 1428
- Fanaroff, B. L. & Riley J. M. 1974:** “*The morphology of extragalactic radio sources of high and low luminosity*”. *MNRAS*.167P..31F
- Ghez, A. M.; et al. 2008:** “*Measuring Distance and Properties of the Milky Way's Central Supermassive Black Hole with Stellar Orbits*”, *ApJ*...689.1044G.
- Gomez, J.L. 2012:** „*Gallery of animations and images for general public*”, http://www.iaa.es/~jlgomez/Jose_L._Gomez/Animations.html
- Keel, B., 2002:** „*Quasars and Active Galactic Nuclei*”, <http://www.astr.ua.edu/keel/agn/>
- Koratkar, A. 1999:** „*The ultraviolet and optical continuum emission in active galactic nuclei: the status of accretion disks*”, http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept04/Koratkar/Koratkar_contents.html.
- Low, F.J. & Johnson, H.L. 1965:** „*The spectrum of 3C 273*”, *ApJ*. 141. 336L
- Martini, P. et al. 2013:** „*The Cluster and Field Galaxy Active Galactic Nucleus Fraction at z = 1-1.5: Evidence for a Reversal of the Local Anticorrelation between Environment and AGN Fraction*”, *ApJ*...768....1M
- NED: „*Seyfert Galaxies*” http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Cambridge/Cambridge1_1.html
- O’Connell:** „*Multicolor Analysis Of Stars & Galaxies*”, <http://www.astro.virginia.edu/class/oconnell/astr511/lec15-f03.pdf>
- Oke, J. B. & Schmidt, M., 1963:** „*Optical Observations of the Radio Source 3C 273.*”, *AJ*....68R.288O
- Padovani, P. 1997:** „*Unified schemes for radio-loud agn: Recent results*”, <http://xxx.lanl.gov/pdf/astro-ph/9701074v1.pdf>
- Peterson, B.M. 2002:** „*The International AGN Watch*”, <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~agnwatch/>
- Peterson, B.M. 1998:** „*Steps toward Determination of the Size and Structure of the Broad-Line Region in Active Galactic Nuclei. XV. Long-Term Optical Monitoring of NGC 5548*”, *1999ApJ*...510..659P

de Paz, G., 2007: „*The GALEX Ultraviolet Atlas of Nearby Galaxies*”, *ApJS*..173..185
Rutkowski, M. J. et al. 2013: „*Investigating the Core Morphology-Seyfert Class Relationship with Hubble Space Telescope Archival Images of Local Seyfert Galaxies*”, *AJ*....146...11R

Sandage, A., Bedke, J. 1994: *The Carnegie Atlas of Galaxies. Volume I*, Carnegie Institution of Washington

Sarkissian, J. 2013: „*Parkes and 3C273 The Identification of the First Quasar*”,
<http://www.parkes.atnf.csiro.au/people/sar049/3C273/>

Schmidt, M. 1963: „*3C 273: A Star-Like Object with Large Red-Shift*”, *Natur*.197.1040S

Schmidt, M. 1983: „*Discovery of quasars*”,
http://www.parkes.atnf.csiro.au/people/sar049/3C273/documents/Maarten_Schmidt_OCR.pdf

Schmitt, J.L. 1968: „*BL Lac identified as a Radio Source*”, *Natur*.218..663S

Schwarzschild, K. 1916: „*Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie*”, in: Sitzungsberichte der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften, Sitzung vom 3. Februar 1916; 189–196 <http://www.scribd.com/doc/25310028/schwarzschild-1916>

Seyfert, C. K. 1943: „*Nuclear Emission in Spiral Nebulae*”, *ApJ*....97...28S

Torres, D.F. & Anchordoqui, L.A. 2004: „*Astrophysical origins of ultrahigh energy cosmic rays*”, *astro-ph/0402371*

Urry, C. M. & Padovani, P. 1996: „*The Unification of Radio-Loud AGN*”, *1996IAUS..175..379U*

Vasudevan, R.V. & Fabian, A.C. 2008: „*Simultaneous X-ray/optical/UV snapshots of active galactic nuclei from XMM-Newton: spectral energy distributions for the reverberation mapped sample*”, [arXiv:0810.3777](https://arxiv.org/abs/0810.3777)

Vermeulen, R.C. et al. 1995: „*When Is BL Lac Not a BL Lac?*”, *ApJ* 452, L5

Veron-Cetty, M.-P.; Veron, P., 2006: „*A catalogue of quasars and active nuclei: 12th edition*”, *A&A*...455..773V

UA astronomical image gallery: „*Seyfert Galaxy NGC 5548 versus normal galaxy NGC 3277*”,
<http://www.astr.ua.edu/gifimages/ngc5548.html>

11. fejezet - A galaxisok térbeli eloszlása, galaxiscsoportok és –halmazok, szuperhalmazok

A Tejútrendszer közvetlen extragalaktikus környezete, a Lokális Csoport, a galaxis halmazok és a még nagyobb léptékű szerveződések áttekintése.

11.1. Galaxis csoport és halmaz

11.1.1. Óriás galaxis és szatellitái

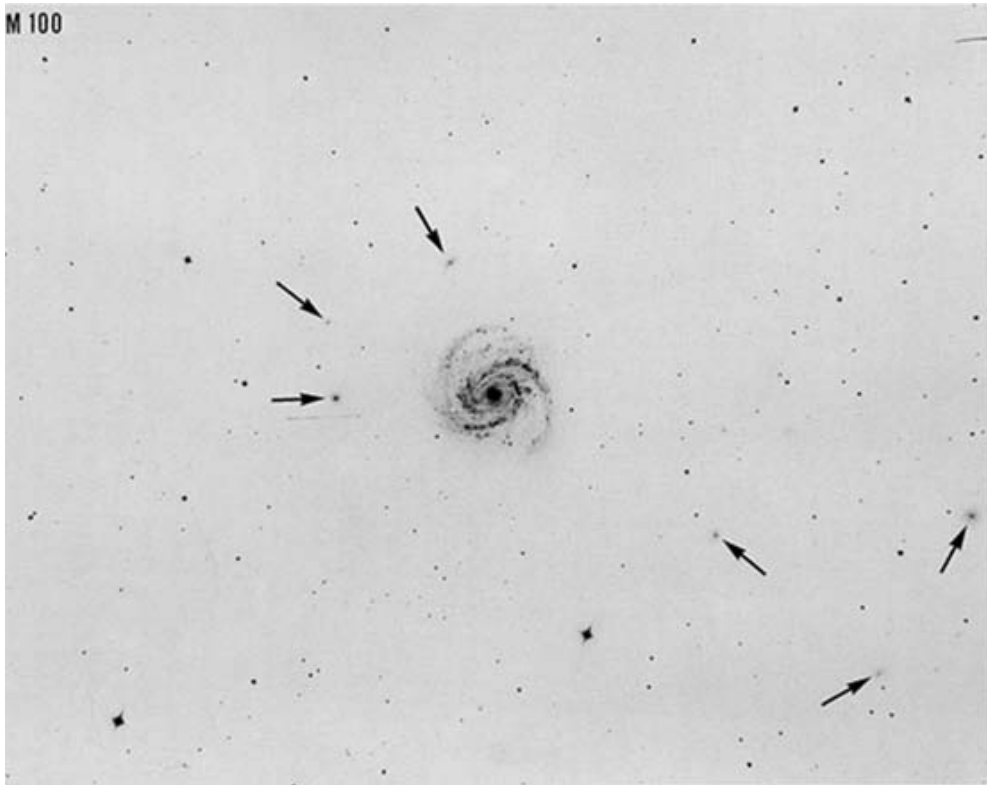
A legkisebb elkülönülő galaxis csoportosulás egy-egy órásgalaxis és szatellita galaxisai. Az ilyen galaxis rendszerekben a kölcsönhatás különböző formái is megfigyelhetők: ár-apály keltő erők miatti deformációk, anyagátadás, illetve a törpe galaxis teljes elnyelése (kannibalizmus”).

A Tejútrendszer szatellita rendszere a teljesség igénye nélkül: Sagittarius Dwarf Galaxy, Large Magellanic Cloud, Small Magellanic Cloud, Canis Major Dwarf, Ursa Minor Dwarf, Draco Dwarf, Carina Dwarf, Sextans Dwarf, Sculptor Dwarf, Fornax Dwarf, Leo I, Leo II, and Ursa Major Dwarf.

Galaxis	Típus	Távolság Mpc	Fényesség	
			M	m
Milky Way	SBbc	—	-20.8	n/a
Canis Major Dwarf	Irr	0.008	?	?
Sagittarius Dwarf Sphr SagDEG	dSph/E7	0.024	-12.67	4.5
Large Magellanic Cloud (LMC)	Irr/SB(s)m	0.050 ^[3]	-17.93	4.5
Boötes Dwarf	d Sph	0.060	-5.8	13.1
Small Magellanic Cloud (SMC)	SB(s)m pec	0.063	-16.35	2.7

11.1. Táblázat A Tejútrendszer és legközelebbi szatellita galaxisai

Az Andromeda galaxis szatellita rendszere a teljesség igénye nélkül: M32, M110, NGC 147, NGC 185, And I, And II, And III, And IV, And V, Pegasus dSph, Cassiopeia Dwarf, And VIII, And IX, and And X.



11.2. ábra: Az M100 óriás spirálgalaxis és 6 törpe elliptikus szatelita galaxisa. Az M101 a Virgo halmaz egyik legfényesebb galaxisa (Reaves 1956, Mount Wilson 100-inch reflector).

11.1.2. Galaxis csoport

A galaxiscsoportok általában 50-nél kevesebb galaxisból állnak, és átlagosan 2Mpc átmérőjűek. A Tejútrendszer az úgynevezett „Lokális Csoport” tagja, melyben legalább 35 galaxis található. A közeli galaxiscsoportok és távolságuk: Sculptor (1,8Mpc), M81 (3,1Mpc), Centaurus (3,5Mpc), M101 (7,7Mpc).

Galaxiscsoportok tulajdonságai:

- tipikus teljes tömeg $\approx 10^{13}$ naptömeg.
- sebesség szórás (a csoporttag galaxisok sebességeiből számítva – ez a tömeg becslésére alkalmas) tipikusan ≈ 150 km/s.
- tömeg-luminozitás arány a naptömegben kifejezett össztömeg és napluminozitásban kifejezett teljes luminozitás aránya (mass to light ratio, M/L – ez a sötétanyag tartalom becslésére alkalmas) ≈ 260

11.1.3. Galaxishalmaz

- A galaxishalmaz (*Cluster of galaxies*) a csoportnál nagyobb elemszámú társulás 50-től 1000 tagig.
- Az elemszám tág határok között változik a gazdag halmaz (rich cluster) és a nagyon kis elemszámú (poor cluster) között.
- További osztályozási szempont, hogy a galaxishalmaz szabályos (regular) azaz nagyjából gömbszimmetrikus eloszlású a középpontja felé növekvő sűrűséggel, vagy irreguláris (irregular) azaz amorf alakzat központi sűrűsödés nélkül.
- Tipikus össztömeg: 10^{14} - 10^{15} naptömeg.
- Tipikus átmérő: 8 Mpc.

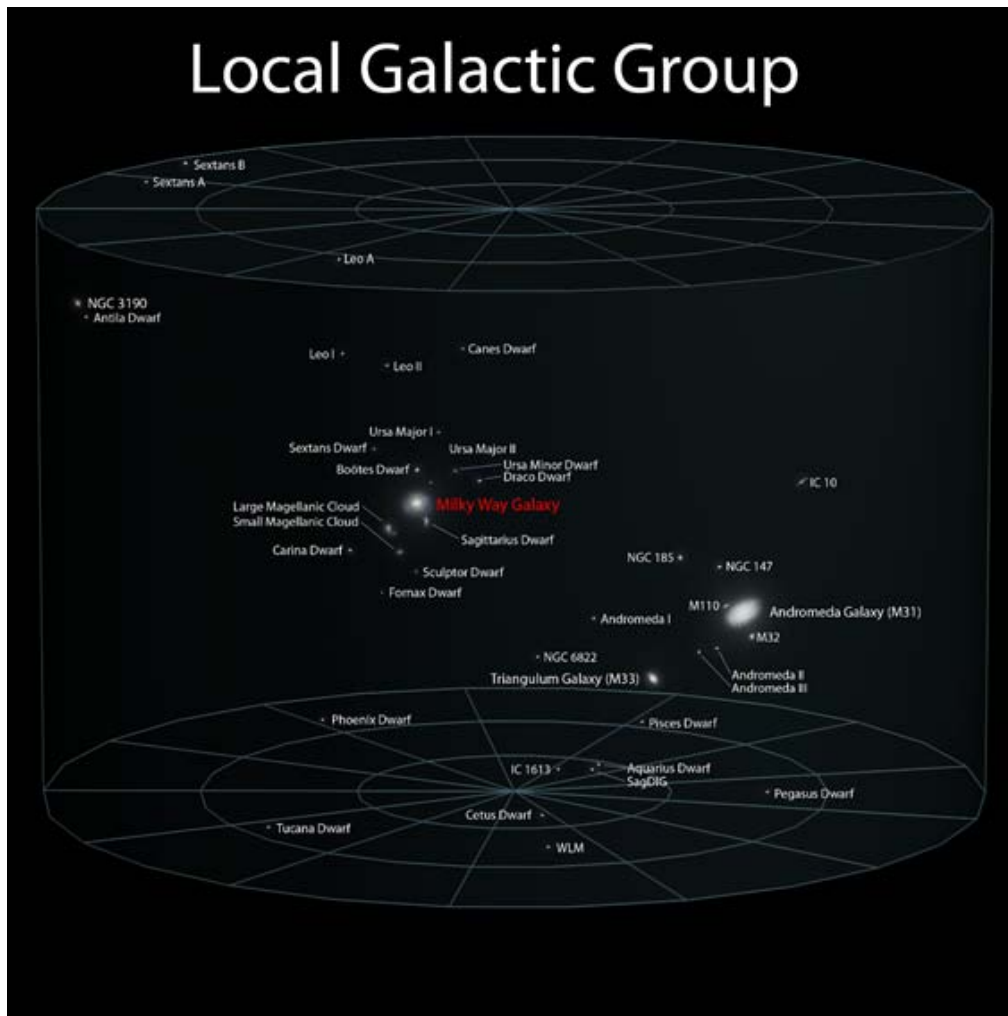
- A galaxishalmazok közti tipikus távolság: 10 Mpc.
- A sebességszórás: 800-1000 km/s.
- A tömeg-luminositás arány: $M/L \approx 400$ tehát nagy a sötétanyag tartalmuk.

11.1.4. Röntgen sugárzó forró gáz galaxishalmazokban

Az intergalaktikus anyag (intracluster medium, ICM) a galaxishalmazok közepében röntgen sugárzása alapján felfedezett forró plazma. Az ionizált gázt lökéshullámok fűtik. Alacsony sűrűsége ($n_{\text{ICM}} = 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$) ellenére össztömege elérheti a 10^{14} naptömeget, amivel a galaxishalmaz barionos anyagának zömét adja. Az intergalaktikus anyag fémessége gazdag galaxishalmazokban kb. 0,4-e a napénak.

11.2. A Lokális Csoport

- A Lokális Csoport (Local Group) kb. 3Mpc átmérőjű
- enyhén elnyúlt alakú
- Teljes tömege: $(1.29 \pm 0.14) \times 10^{12} M_{\odot}$
- A Virgo Szuperhalmaz (Virgo Supercluster) tagja sok más galaxiscsoporttal együtt
- A Lokális Csoport két galaxisa látható szabad szemmel, vagy kisebb távcsővel is, az északi égbolton: az M31 és M33, és kettő a délin: az LMC és SMC
- Az **Andromeda Galaxis (M31)** egy óriás spirálgalaxis, a Tejútrendszerre hasonlít, kb. 725 kpc távolságban. Szabad szemmel csak egy ködfoltnak tűnik, de már egy kisebb távcsővel is lencse alakú objektumot látunk két törpe elliptikus kísérelével.
- Az **M33 avagy Triangulum** galaxis, az Andromeda galaxisához hasonló távolságban található, de annál kisebb tömegű spirálgalaxis.



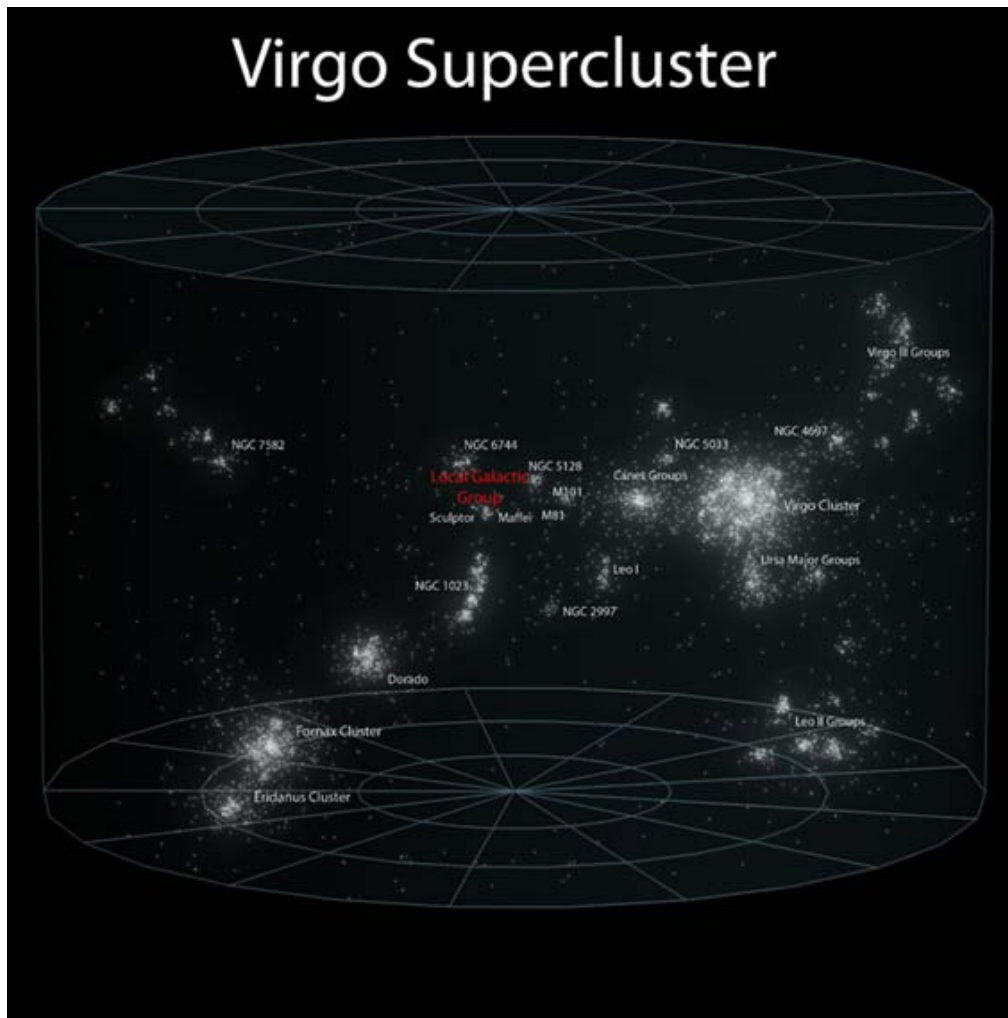
11.3. ábra: A Lokális Csoport galaxisainak térbeli elhelyezkedése (nem teljes).
[http://en.wikipedia.org/wiki/File:5_Local_Galactic_Group_\(ELitU\).png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:5_Local_Galactic_Group_(ELitU).png)

11.3. A Virgo szuperhalmaz

A galaxis-szuperhalmazokra nem feltételezzük, hogy gravitációsan kötöttek, tehát a Hubble-tágulás idővel széthúzza őket

Jellemzőik:

- 20-50 Mpc átmérő
- 5000-10000 km/s sebesség-diszperzió
- Sok ezer galaxis
- Nagyobb skálán filamentumokba szerveződnek



11.4. ábra: A Virgo Szuperhalmaz ([http://en.wikipedia.org/wiki/File:6_Virgo_Supercluster_\(ELitU\).png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:6_Virgo_Supercluster_(ELitU).png))

- **Korong és halo a Virgo Szuperhalmazban**

- A galaxisok eloszlása alapján egy lapult korong komponenst különíthetünk el a Virgo Szuperhalmazban, mely a szuperhalmaz legnagyobb luminozitású galaxisainak 60%-át tartalmazza. Alakját palacsintához is hasonlítják.
- The halo komponensben sok elnyúlt alakú objektum látszik, és a Virgo Szuperhalmaz legfényesebb galaxisainak 40%-át tartalmazza.

- **További szerkezeti elemek**

- A Virgo Szuperhalmaz galaxishalmazok csoportjaira bontható, ezek elnevezése: *galaxisfelhők* (galaxy clouds).
- A szuperhalmaz korongjában 3 galaxisfelhőt találunk: a Virgo halmaz, a Canes Venatici felhő és a Virgo II felhő.
- The haloban több elnyúlt galaxisfelhőt találunk, melyek a Virgo halmaz felé „mutatnak”.
- A szuperhalmaz kb. 100 galaxiscsoportot illetve halmazt tartalmaz.

- **Átmérő és a Tejútrendszer helye**

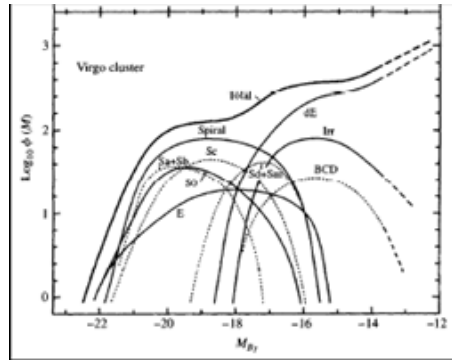
- A Virgo Szuperhalmaz átmérője kb. 150Mpc. A Virgo halmaz a középpontban van, míg a Tejútrendszer a szuperhalmaz szélén helyezkedik el, és a középpont felé mozog. Nem kizárható, hogy a Lokális Csoport be fog hullani a Virgo Halmazba.

- **Tömeg**

- A galaxisok mozgásából becslve a Virgo Szuperhalmaz tömege kb. 10^{15} naptömeg, melynek nagyobb része sötétanyag lehet.

- **Mozgás**

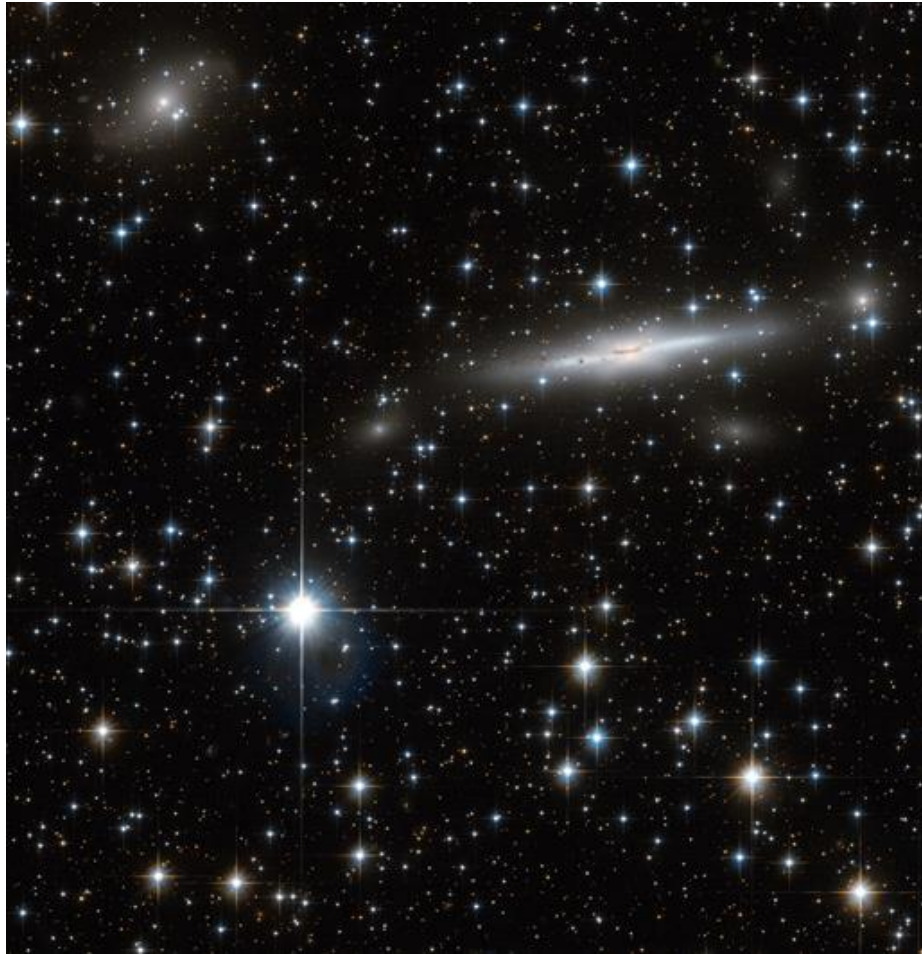
- A teljes Virgo Szuperhalmaz egy gravitációs anomália felé látszik mozogni, a Norma galaxishalmaz irányában, melyet hatása miatt csak, mint a Nagy Mozgató (Great Attractor) emlegetnek.



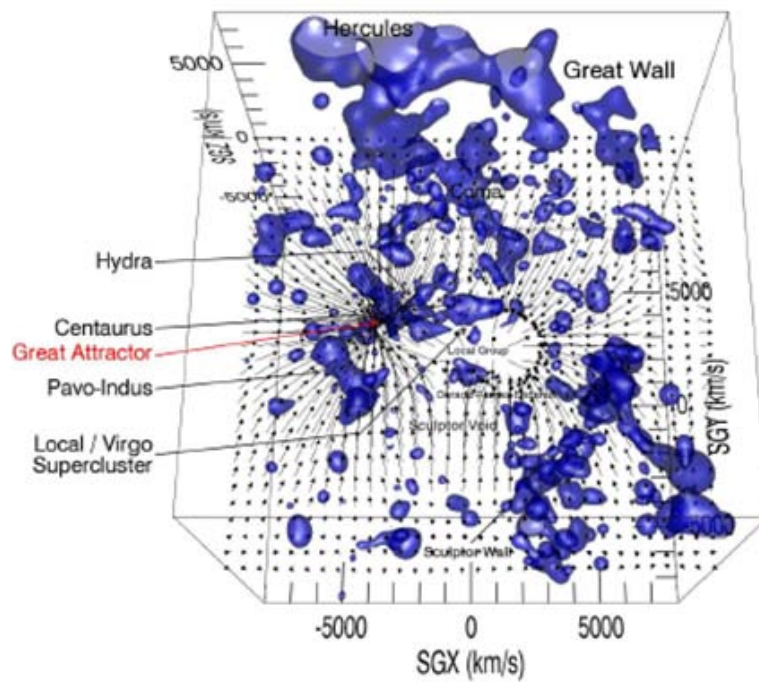
11.5. ábra: Luminozitási függvény a Virgo galaxishalmaz összes objektumára, illetve az egyes komponensekre külön

11.4. A Nagy Mozgató (Great Attractor)

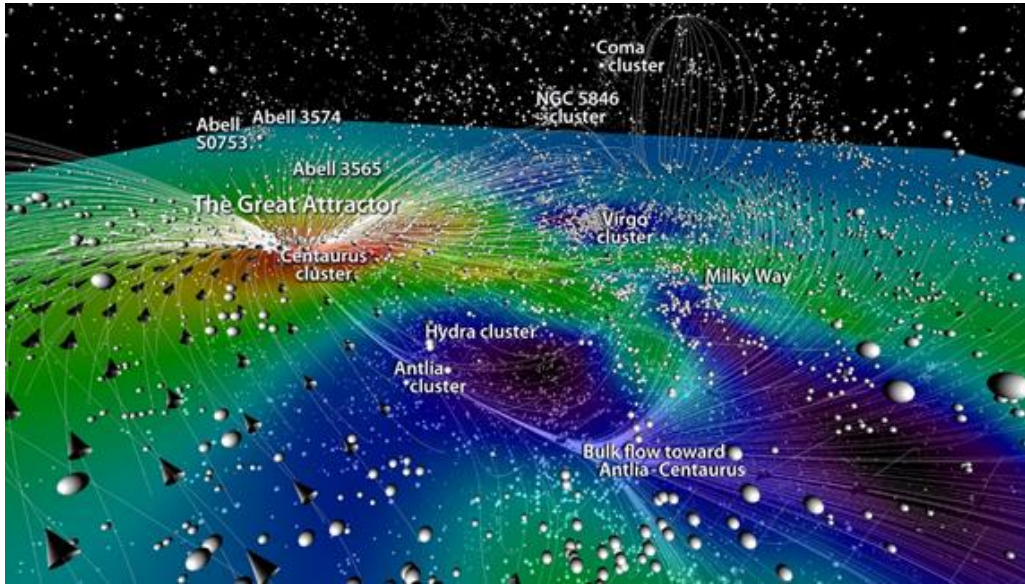
A Világegyetem tágulásában már az 1970-es években felfedezni véltek egyfajta inhomogenitást, mintha a közeli galaxishalmazok egy Nagy Mozgató (Great Attractor) felé áramolnának a Hydra és Centaurus csillagképek irányába. Az $600\text{-}700 \text{ km s}^{-1}$ sebességű áramlás lehetséges okát a 2000-es évekre egy kb. 80 Mpc távolságban (lásd 11.6. ábra). A Norma galaxishalmazzal egybe eső óriási, de nem látszó tömegben vélték. Később egy távolabbi objektumot, a Shapley szuperhalmazt (150Mpc távolságban) okolták a gravitációs anomáliáért (Kocevski et al. 2005).



11.6. ábra: A Norma galaxishalmaz a Nagy Mozcátó vélt irányában az ESO 137-002 spirálgalaxissal és a Tejútrendszer (előtér) csillagaival. (ESA/NASA, HST, http://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/science/great-attractor.html)



11.7. ábra: Tömegeloszlás a közeli Univerzumban. A perspektivikus ábrán feltűnik a Tejútrendszert is magába foglaló Virgo szuperhalmaz, a Hercules és Coma galaxishalmazok, és a Nagy Mozgató (Great Attractor), valamint az úgynevezett Nagy Fal (Great Wall) és a Déli Nagy Fal (Sculptor Wall) is (Pomarède et al. 2013).



11.8. ábra: A nagy kozmikus áramlások (Pomarède et al. 2013, <http://www2.ifa.hawaii.edu/newsletters/article.cfm?a=645&n=52>).

11.5. Falak és üregek rendszere

11.5.1. A Nagy Fal (Great Wall)

A vöröseltolódás felmérések jelentős galaxis koncentrációt mutattak bizonyos z értékeknél egy-egy irányban. A vöröseltolódást távolsággként értelmezve ez „falak” jelenlétére utal, azaz az eloszlás 100-200Mpc skálán nem egyenletes.

A Nagy Fal (Great Wall) legalább 85 Mpc deklináció és 215 Mpc rektaszczenzió irányban, de valószínűleg még ennél is nagyobb, hiszen teljes kiterjedésében még nem térképezték fel. Ugyanakkor vastagsága kisebb, mint 7 Mpc (lásd 11.7. ábra).

Egy hasonló szerkezet látszik a déli égbolton is, az úgynevezett Déli Nagy Fal (Great Southern Wall, Sculptor Wall). Valószínűleg mindkettő nagyobb szálas (filamentáris) szerkezetekhez kapcsolódik (lásd 11.7. ábra).

11.5.2. Az Univerzum méhsejtes szerkezete

A tömeg szerveződési szintjei tehát: galaxisok, galaxiscsoporthok, galaxishalmazok, galaxisfelhők, szuperhalmazok, filamentumok, végül a filamentumok találkozásánál óriás szuperklaszterek. A filamentumok között üregek 100 Mpc átmérővel.

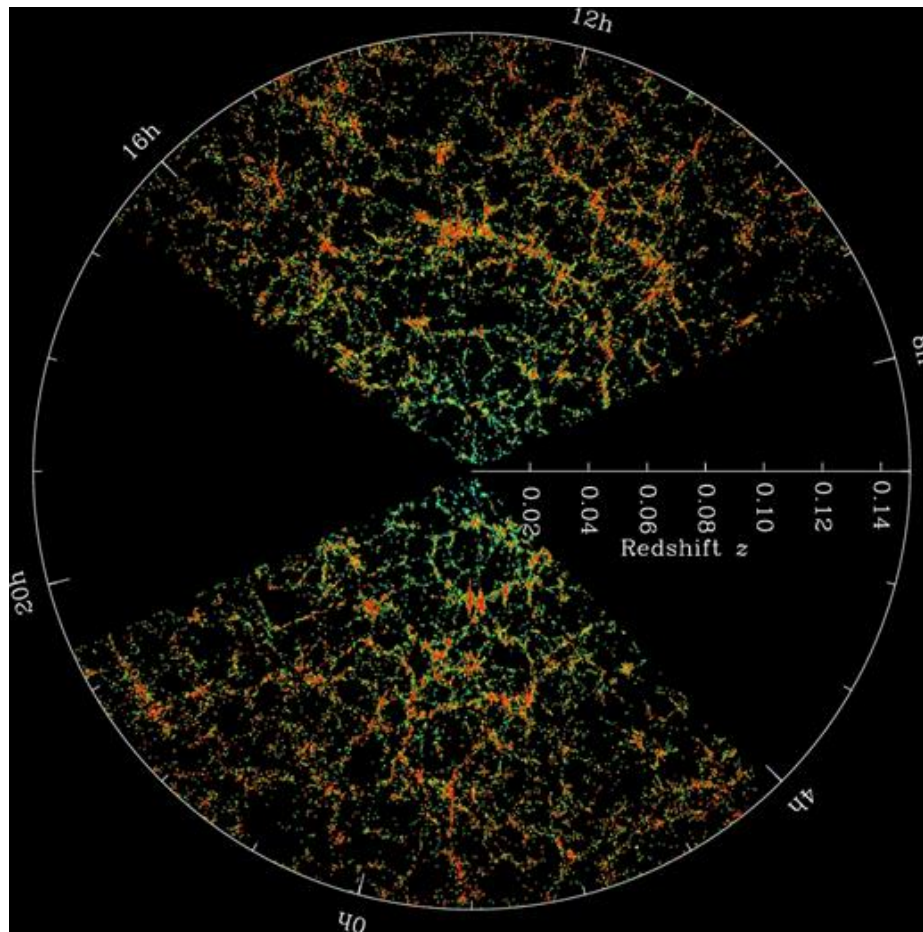
11.5.2.1. Az SDSS felmérés

A Sloan Digital Sky Survey (SDSS) egy egyedülálló kezdeményezés az égbolt negyedének felmérésére galaxisok, kvazárok és csillagok fotometriai és spektrális adatainak meghatározására és értelmezésére. A 95%-os teljesség határa 22 magnitúdó. Öt szélessávú szűrővel kimért magnitúdó adatokat rendelnek minden megfigyelt égitesthez. E feltérképezés mélysége minden korábbit túlszárnyaló statisztikus vizsgálatokat tesz lehetővé. A feldolgozást automatikus algoritmusok láncolata végzi. Első lépésben a vöröseltolódás és a nebuláris emisszió közvetlenül leolvasható a spektrumból, de további mennyiségek is kinyerhetők, mint az életkor és a fémtartalom.

Az SDSS felmérés eszközei:

- Speciális nagylátószögű távcső (3° átmérő = $6 \times$ a telihold)
- 120 Mpix CCD kamera
- 5 színszűrő
- 640 szálal spektrográf

A rendszer 2000 óta gyűjt adatot. Több mint 540 millió objektumot (csillag, galaxis, kvazár) azonosítottak a 20 terabyte-nyi képi adatmezőn, ebből egy 4,5 terabyte-os adatbázist építettek. A felmérés részben Szalai A. Sándor (Alex A. Szalay) tervei szerint és vezetésével, és jelentős magyar részvétellel folyik.



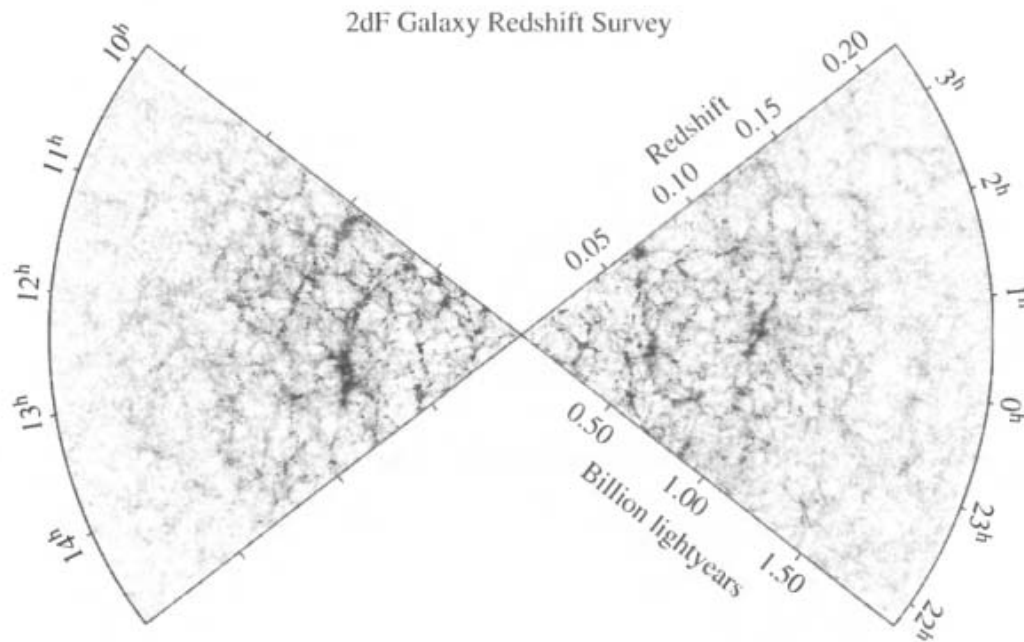
11.7. ábra: „Szeletek” a $-1,25 < \delta < 1,25$ deklináció intervallumban az SDSS 3 dimenziós galaxis-eloszlás térképéből. A Föld a koordinátarendszer középpontja, és minden pont egy-egy galaxist jelöl. A galaxisok színekódja: a nyugalmi $g-r$ színindex szerint, a vörösebbek idősebbek. A nem térképezett irányokban a Galaktikus extinkció túl nagy. (M. Blanton and the Sloan Digital Sky Survey http://www.sdss.org/includes/sideimages/sdss_pie2.html)

11.5.2.3. További vöröseltolódás felmérések

A galaxis vöröseltolódás felmérések célja, hogy bemenő adatot szolgáltatassanak a galaxisok eloszlásának modelljeihez. Az általános és jelentősnek mondható felmérések:

- nem korlátozódnak valamely specifikus égi területre,
- spektrális felbontásuk megfelelően nagy ($R > 100$ – lásd Függelék),
- van valamilyen előválogatási rendszerük a galaxisokra, ezzel például a csillagokat és kvazárokat kizárják,

- nagyszámú vöröseltolódást meghatároznak ($N > 5000$)



11.9. ábra: A 2dF vöröseltolódás felmérés

Néhány felmérés:

Las Campanas Redshift Survey

ESO Slice Project

IRAS PSC Redshift Survey

CNOC Redshift Survey

6dF Galaxy Survey

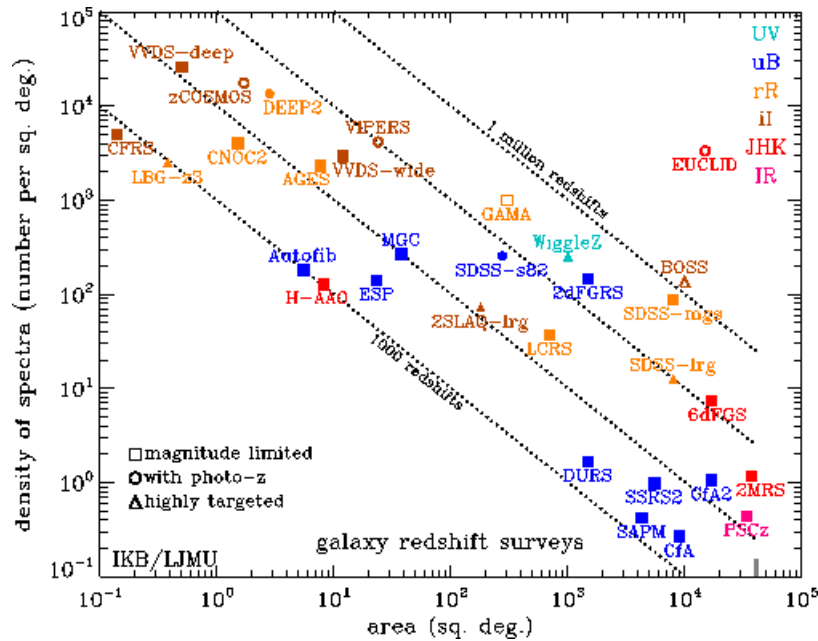
ESO Nearby Abell Cluster Survey

2MASS Redshift Survey

DEEP Project

VIRMOS-VLT Deep Survey

Durham/UKST redshift survey



11.10. ábra: A galaxis vöröseltolódás felmérések összehasonlítása. A felvett spektrumok 1° -ra eső száma a felmért terület nagyságának függvényében. Jelölések: négyzet – fényesség korlátos; kör – fotometriával előválogatott vöröseltolódás; háromszög – erősen válogatott célpontok. A párhuzamos pontozott vonalak 1000, 10000, 10000 és 1 millió vöröseltolódás mérést jeleznek. (Ivan K. Baldry, <http://www.astro.ljmu.ac.uk/~ikb/research/compare-surveys.gif>)

Lásd még Függelék.

Referenciák és további olvasnivaló a fejezet témájában:

Ahn, C.P. et al. 2013: „The tenth data release of the Sloan Digital Sky Survey: first spectroscopic data From the SDSS-III apache point observatory galactic evolution experiment.”, *ApJS*, <http://www.sdss3.org/science/dr10.pdf>

Belokurov, V. et al. , 2006: „A Faint New Milky Way Satellite in Bootes”, *ApJ*...647L.111B

Dobos L.: „Az Univerzum szerkezete”

<http://www.vo.elte.hu/~dobos/public/download/old/Az%20Univerzum%20szerkezete.pdf>

I. D. Karachentsev et al.(2004): „A Catalog of Neighboring Galaxies” , *AJ*...127.2031K

<http://iopscience.iop.org/1538-3881/127/4/2031/fulltext/>

I. D. Karachentsev (2005): "The Local Group and Other Neighboring Galaxy Groups". *Astronomical Journal* 129: 178–188. doi:10.1086/426368. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005AJ....129..178K>.

Kocevski, D.D. et al. 2005: „Mapping large-scale structures behind the galactic plane: the second ciza subsample”, <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/0512321v1.pdf>

Loewenstein, M. 2003: “Chemical Composition of the Intracluster Medium”,

<http://arxiv.org/pdf/astro-ph/0310557v1.pdf>

Pomarède, D et al. 2013: „Visualization of structures and cosmic flows in the local Universe”, *2013IAUS*..289..323P

Seigar, M.S. 2007: „A New Mass Model for M31”, in „Galaxy Evolution across the Hubble Time” Proceedings IAU Symposium No. 235, F. Combes & J. Paloučs, eds., p.135

Smolčić, V. et al. 2006: „*The rest-frame optical colours of 99 000 Sloan Digital Sky Survey galaxies*”, Mon. Not. R. Astron. Soc. 371, 121

ELTE Csillagászati Tanszék, ICSIP Kozmológia oldalak

Függelék, A kozmológiai elvek, (8.5) Robertson-Walker metrika

<http://astro.elte.hu/icsip/kozologia/fuggelek/index.html>

A Standard Modell, A standard modell alapjai, newtoni közelítés (2.4) λ bevezetése

http://astro.elte.hu/icsip/kozologia/standard_modell/standard_alap.html

Precíziós kozmológia, Kozmológiai állandók, Ω bevezetése

http://astro.elte.hu/icsip/kozologia/precizios_kozm/koz_m_all.html

Alternatív Kozmológiai Modellek, λ -tagos kozmológiák (6.5)

http://astro.elte.hu/icsip/kozologia/alternativ/lambda_kozm.html

Függelék, A megfigyelési kozmológia eszközei - Szögtávolság és vöröseltolódás összefüggése

http://astro.elte.hu/icsip/kozologia/fuggelek/megfigy_kozm.html

12. fejezet - Függelék

12.1. Spektrális felbontás

A spektrális felbontást mérhetjük egyszerűen a még megkülönböztethető legkisebb hullámhossz eltéréssel: $\Delta\lambda$, vagy a relatív felbontással, mely a Doppler eltolódás figyelembevételével a mérés $\Delta\nu$ relatív sebesség felbontásával is megfeleltethető:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{c}{\Delta\nu} \quad (12.1)$$

Példák: Az SDSS felmérés alacsony felbontású spektrumaira $R < 2000$, de a DR10-es adatközléskor $R_{\text{NIR}} \approx 22500$ (H sáv) felbontású csillag és galaxis spektrumokat szolgáltatott. Az ESO Multi-Object Optical and Near-infrared Spectrograph egyszerre 500 objektum spektrumát méri, felbontása a látható tartományban $R_R \approx 7500$ (Johnson R sáv), az infravörös tartományban $R_{\text{NIR}} \geq 20000$ (ha $\lambda \geq 1,2\mu\text{m}$) (lásd: Cirasuolo et al. 2011).

12.2. Detektor jellemző paraméterei

1. **Kvantumhatásfok** (quantum efficiency): η az egy foton által átlagosan generált töltéshordozók száma.

$$\eta = \frac{n_e}{n_\gamma} = \frac{q}{E} = \frac{hc}{q\lambda} \frac{I_p}{E} \quad (12.2)$$

2. **Érzékenység** (responsivity), R a bejövő optikai teljesítmény által generált fotoáram karakterisztika meredeksége, azaz 1mW belépő optikai teljesítmény hatására hány mA fotoáram keletkezik.

$$R = \frac{I_p}{P_o} \left[\frac{\text{A}}{\text{W}} \right] = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q \lambda}{hc} = \eta \frac{\lambda [\mu\text{m}]}{1,24} \left[\frac{1}{\text{V}} \right] \quad (12.3)$$

3. **Érzékenységi küszöb** (sensitivity) – a legkisebb még detektálható jel

4. **A vevő által hozzáadott zaj** (NEP: Noise Equivalent Power) – Az az optikai teljesítmény, amit a vevőre adva a zajjal megegyező egységnyi sávszélességre esőelektromos teljesítményt kapnánk a kimeneten.

5. **Sötétáram** (dark current) – a bejövő optikai teljesítmény nélkül is megjelenő áram

12.3. Spektrumvonal félérték-szélessége

A félérték-szélesség, azaz a vonalprofil maximum értéke felénél vett teljes szélessége (full width at half maximum, FWHM). A csillagközi gáz rádió spektroszkópiájában a spektrumvonalak alakját gyakran közelítik Gauss-görbével.

Az m várható értékű σ szórású Gauss-eloszlás, vagy normális eloszlás:

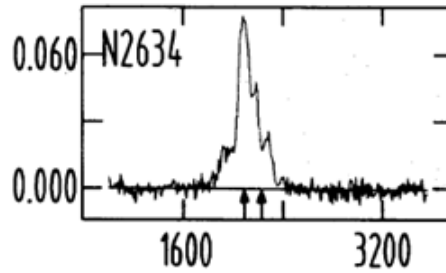
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (12.4)$$

$$\text{Max}(f(x)) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad \text{a maximum értéke} \quad (12.5)$$

$$FWHM = 2\sigma\sqrt{2\ln 2} \approx 1,18(2\sigma)$$

a teljes szélesség a maximum felénél (12.6)

A félérték-szélesség, azaz a „harang-görbe” maximum értéke felénél vett teljes szélesség (FWHM) a Gauss-görbére (10.6) szerint számítható. A gyakorlatban a vonalkiszélesedés termikus és turbulens komponense Gauss-görbét eredményez, de a gázban fellépő áramlások nem Gauss-görbe szerű, gyakran nem is szimmetrikus vonalprofil eredményeznek. Végül a spektrum vonal, különösen igaz ez a hidrogén 21cm-es spektrumvonalára, általában több kvázi Gauss-görbe összege. A mért HI 21 cm-es spektrumvonalak így a spektrális felbontás szerint mintavételezett általában nem Gauss-i profilok. Ezek félérték-szélességét már nem csak a gáz kinetikus és turbulens állapota és áramlásai határozzák meg, hanem a látóirányban integrált minden mozgás, beleértve például a mért rendszer (például teljes galaxis) forgását is.



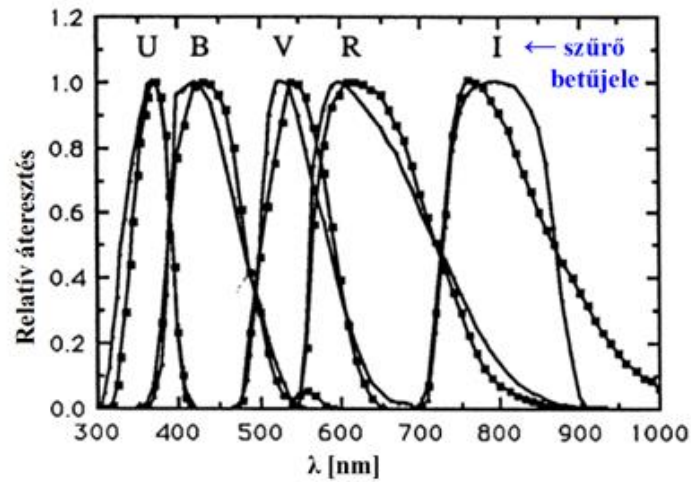
12.1. ábra: A HI 21cm-es spektrumvonal az NGC 2634 elliptikus galaxisra. A sebességet (vízszintes tengely) km/s-ban, a 21cm-es fluxust Jy-ben ábrázoljuk. A vonalszélességek a maximum 50 és 20%-ánál: $\Delta v_{50} = 107 \text{ kms}^{-1}$, $\Delta v_{20} = 404 \text{ kms}^{-1}$ (Huchtmeier et al. 1995).

12.4. Fotometriai rendszerek

12.4.1. Johnson fotometriai rendszer

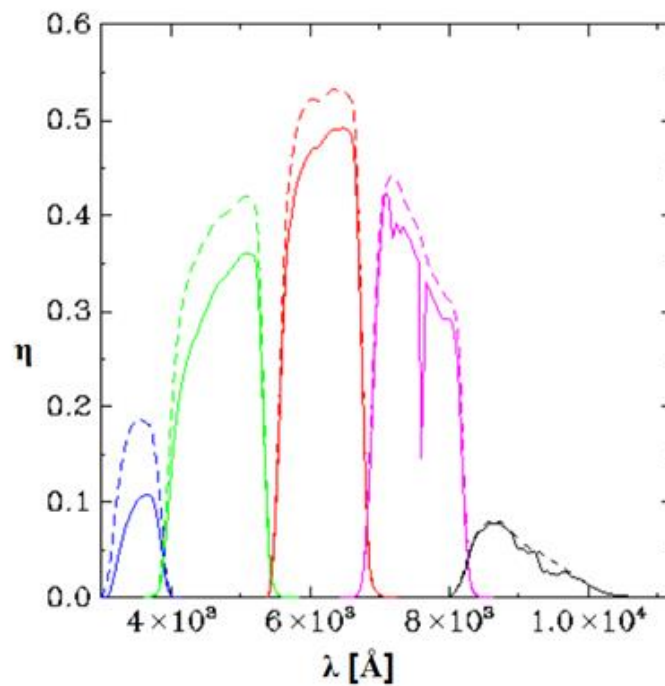
szűrő betűjele	λ_{eff} hullámhossz	effektív $\Delta\lambda$ félérték-szélesség (FWHM)	„szín”
U	365 nm	66 nm	ultraibolya (ultraviolet)
B	445 nm	94 nm	kék (blue)
V	551 nm	88 nm	sárgászöld (visual)
R	658 nm	138 nm	vörös (red)
I	806 nm	149 nm	infravörös (infrared)
J	1220 nm	213 nm	infravörös
H	1630 nm	307 nm	infravörös
K	2190 nm	390 nm	infravörös
L	3450 nm	472 nm	infravörös
M	4750 nm	460 nm	infravörös

12.1. táblázat: A Johnson-féle szűrőrendszer



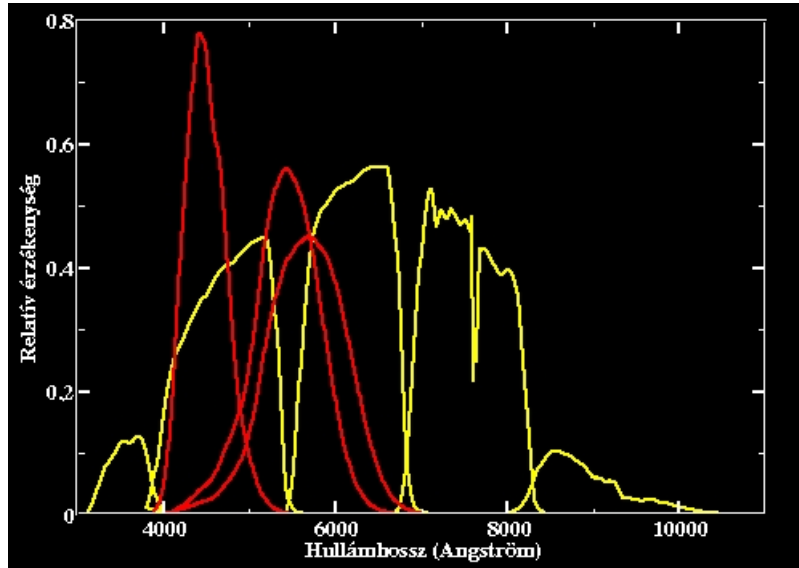
12.2. ábra: A Johnson (vonalak tele négyzetekkel) és a Bessel szűrőrendszer összehasonlítása Bessel (1990) szerint.

12.4.2. Az SDSS fotometriai rendszere



12.3a. ábra: Az SDSS felmérés fotometriai rendszer (detektor+szűrők) válaszfüggvénye és ugyanez 1.3 levegőtömeg érték mellett az atmoszféra hatását is beleszámítva a fotometriai rendszerbe.

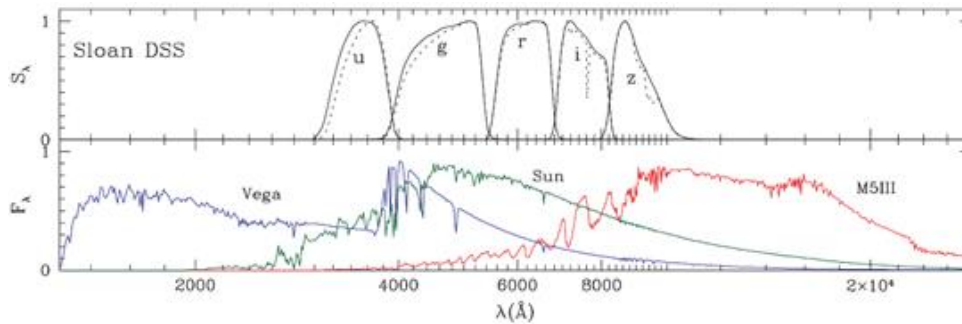
<http://www.sdss.org/dr3/instruments/imager/>



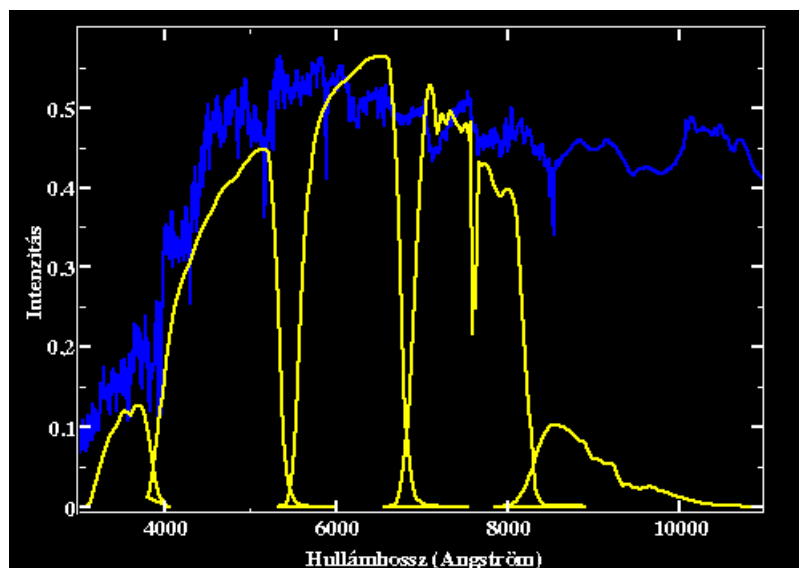
12.3b. ábra: Az SDSS színszűrő-detektor rendszere válaszfüggvénye a hullámhossz függvényében (sárga görbék), a sávok jelei: *u, g, i, r* és *z*. Összehasonlítás képpen az emberi szem 3 csapjának érzékenységét (piros) is megadjuk.

Az SDSS *z* és *i* szűrőjével az infravörös tartományban is mér.

<http://cas.sdss.org/dr5/hu/proj/challenges/photoz/photometry.asp>



12.3c. ábra: Az SDSS spektrális válaszfüggvénye a légkör figyelembevételével (fent) és 3 csillagspektrum (lent) összevetése. (Girardi et al. 2004)



12.1. animáció: Vöröseltolódás animáció. Az egymás utáni képeken egy elliptikus galaxis spektrumát figyelhetjük meg miközben képzeletben egyre növeljük a vöröseltolódását. Az előtérben álló görbék az SDSS színszűrőinek (u,g,i,r,z) átvitelét jellemzik <http://cas.sdss.org/dr5/hu/proj/challenges/photoz/images/zanimHu.gif>

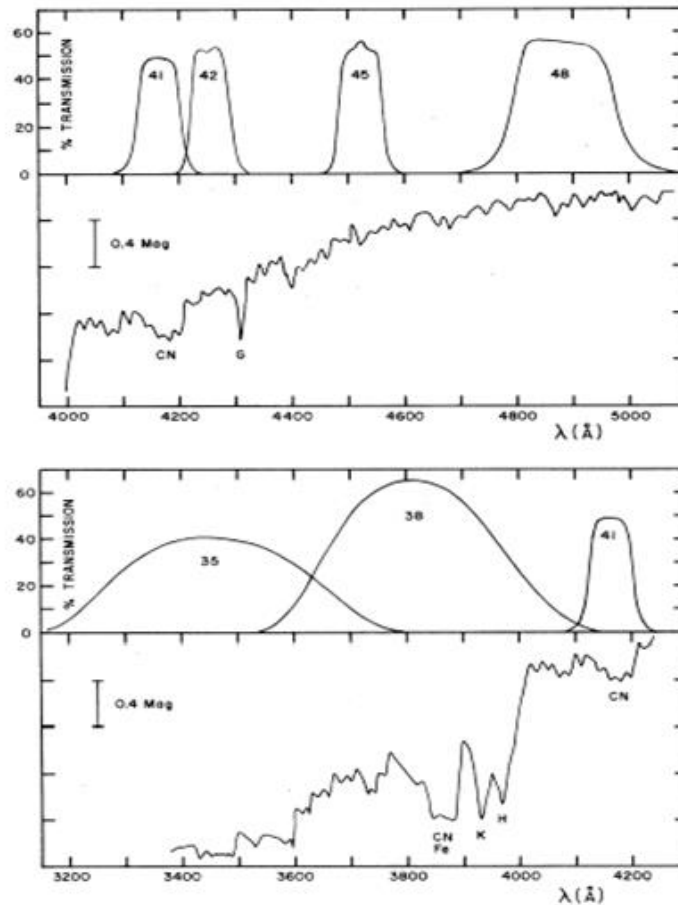
12.4.3. A DDO fotometriai rendszer

A DDO fotometriai rendszert a Toronto közelében épült **David Dunlap Observatory** munkatársai Robert McClure és Sidney van den Bergh (1968) fejlesztették ki azzal a céllal, hogy galaxismagok integrált fotometriai mérését ezzel végezzék. Csillagpopulációs modelleket kívántak alkotni. Eredetileg a Johnson UBV rendszer kiegészítésének szánták a közepes (kb. 4nm) sávzélességű szűrőrendszert. A csillag-hőmérséklet és luminozitás hatásokat akarták elkülöníteni a vörösödéstől és ultraibolya többlettől. Az eredeti szűrőrendszert és a standard csillagokat később McClure (1975) módosította. Az ismételt méréseket már nem a kedvezőtlen asztroklimájú DDO-ban, hanem a Kitt Peak National Observatory-ban végezték egy kicsit módosított szűrő készlettel. A sávzélességek: 3 szűrőre 18,6nm < $\Delta\lambda$ < 38,3nm és 3 továbbira 7,3nm < $\Delta\lambda$ < 8,3nm voltak (lásd 10.2. táblázat, és 10. 5. ábra).

TABLE II. Specifications for DDO filters.

Filter	λ (Å)	$\Delta\lambda$ (Å)	Type
48*	4886±2.5	186±10	Interference
45	4517±2.5	76± 5	Interference
42	4257±2.5	73± 5	Interference
41	4166±2.5	83± 5	Interference
38 ^b	3815	330	5 mm Corning 7-51 +2 mm Schott GG375
35	3460	383	8 mm Schott UG11 +1 mm Schott WG345

12.2. táblázat: A DDO szűrőrendszer (McClure 1975).



12.5. ábra: A DDO fotometriai rendszer áteresztési függvényei és egy példaszpektrum (McClure 1975).

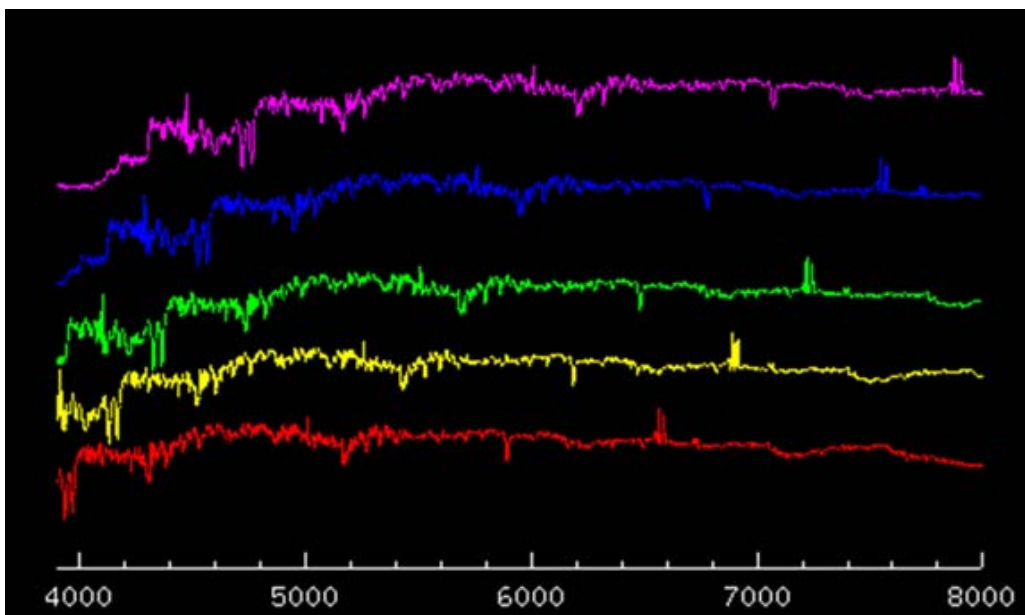
12.5. Vöröseltolódás

A vöröseltolódás a nyugalmi és mért hullámhosszak arányából a c fénysebességnél jóval kisebb sebességek esetén a vöröseltolódás a β fényhez viszonyított sebességet adja:

$$z = \frac{\lambda_{\text{mért}}}{\lambda_{\text{nyugalmi}}} - 1 \approx \frac{v}{c} = \beta \quad v \ll c \quad (12.7)$$

Relativisztikus sebességekre a (Hendrik Lorezről elnevezett) γ Lorentz-tényező 1-től különböző értéket vesz fel és már nem elhanyagolható, ezért a sebességet a vonaleltolódásból a Lorentz-tényező figyelembevételével számoljuk:

$$z = \frac{\lambda_{\text{mért}}}{\lambda_{\text{nyugalmi}}} - 1 = (1 + \beta) \gamma - 1 \quad \gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (12.8)$$



12.6. ábra: Galaxis spektrum abszorpciós és emissziós vonalakkal öt különböző vöröseltolódás értékkel (a minta spektrum lett eltolva), alulról felfelé rendre $z = 0,0, 0,05, 0,10, 0,15, 0,20$.

(<http://cas.sdss.org/dr6/en/sdss/data/data.asp>)

12.6. Spektroszkópiai felmérések a galaxisok eloszlására

12.6.1. Látható és közeli-infravörös felmérések ABC sorrendben:

- AGN and Galaxy Evolution Survey (AGES): 18000 vöröseltolódás; (galaxisok); $> 7,7^\circ$; various selections including $R < 20,0$ and $B_W < 21,3$; [AGES honlap, referencia publikáció \(2012\)](#).
- CfA2 Redshift Survey: 18000 vöröseltolódás; $> 17000^\circ$; $B < 15,5$; [CfA honlap, referencia publikáció \(1999\)](#).
- CNOC2 Field Galaxy Redshift Survey: 6000 megmért vöröseltolódás; $> 1,5^\circ$; $R < 21,5$; [CNOC2 honlap, referencia publikáció \(2000\)](#).

- **DEEP2** Redshift Survey: 38000 megmért vöröseltolódás; $> 2,8 \square^\circ$, $R_{AB} < 24,1$ with color selection; [DEEP2 honlap](#), [referencia publikáció \(2003\)](#).
- Galaxy And Mass Assembly (**GAMA**) redshift survey: cél: 300000 megmért vöröseltolódás; $> 300 \square^\circ$, $r < 19,8$ és további korlátok z és K sávú fényességre; [GAMA honlap](#), [referencia publikáció \(2010\)](#).
- Las Campanas Redshift Survey (**LCRS**): 26000 megmért vöröseltolódás; $> 700 \square^\circ$, $R < 17,5$ nominal; [LCRS honlap](#), [referencia publikáció \(1996\)](#).
- Millennium Galaxy Catalogue (**MGC**): 10000 megmért vöröseltolódás; $> 37,5 \square^\circ$, $B < 20,0$; [MGC honlap](#), [referencia publikáció \(2003\)](#).
- 6dF Galaxy Survey (**6dFGS**): 125000 megmért vöröseltolódás; $> 17000 \square^\circ$, $K < 12,75$ and other limits in BRIJH; [6dFGS honlap](#), [referencia publikáció \(2009\)](#).
- Sloan Digital Sky Survey (**SDSS**): [SDSS honlap](#), [referencia publikáció \(2000\)](#), [EDR paper \(2002\)](#). Különbéféle spektroszkópiai felmérések:
 - Fő galaxis minta (SDSS-MAIN): 700000 megmért vöröseltolódás; $> 8000 \square^\circ$, $r < 17,77$; [Fő galaxis minta publikáció \(2002\)](#).
 - Luminous Red Galaxies (SDSS-LRG): 100000 megmért vöröseltolódás; $> 8000 \square^\circ$, $r < 19,5$ szín szerinti válogatással; [LRG cikk \(2001\)](#).
 - Stripe 82 galaxy surveys (SDSS-S82): about 70000 megmért vöröseltolódás; $> 275 \square^\circ$, a válogatásban $u < 20,5$ szín szerint is válogatva, és $r < 19,5$ válogatások; [SDSS DR4 paper \(2006\)](#), [u-sáv Galaxis Referencia publikáció \(2005\)](#).
- Southern Sky Redshift Survey (**SSRS2**): 5400 megmért vöröseltolódás; $> 5500 \square^\circ$, $B < 15,5$; link [referencia publikáció \(1998\)](#).
- 2dF Galaxy Redshift Survey (**2dFGRS**): 220000 megmért vöröseltolódás; $> 1500 \square^\circ$, $b_J < 19,45$ névleges; [2dFGRS honlap](#), [referencia publikáció \(2001\)](#), [cikk a végső adatszolgáltatáskor \(2003\)](#).
- 2dF-SDSS LRG and QSO (**2SLAQ**) Luminous Red Galaxy Survey: 13000 megmért vöröseltolódás; $> 180 \square^\circ$, $i < 19,8$ szín szerinti válogatással; [2SLAQ honlap](#), [LRG referencia publikáció \(2006\)](#).
- 2MASS Redshift Survey (**2MRS**): 43500 megmért vöröseltolódás; $> 37000 \square^\circ$, $K < 12,2$; [2MRS honlap](#), [referencia publikáció \(2012\)](#).
- VIMOS Public Extragalactic Redshift Survey (**VIPERS**): cél: 100000 megmért vöröseltolódás; $> 24 \square^\circ$, $I_{AB} < 22,5$ with color selection; [VIPERS honlap](#).
- VIMOS VLT Deep Survey (**VVDS**): [VVDS honlap](#), [referencia publikáció \(2005\)](#). Három fő spektroszkópiai felmérés:
 - VVDS-wide: 35000 megmért vöröseltolódás; $> 12 \square^\circ$, $I_{AB} < 22,5$; link [VVDS wide referencia publikáció \(2008\)](#).
 - VVDS-deep: 12000 megmért vöröseltolódás; $> 0,5 \square^\circ$, $I_{AB} < 24,0$.
 - VVDS-ultradeep: 1000 megmért vöröseltolódás; $> 0,17 \square^\circ$, $I_{AB} < 24,75$.
- **zCOSMOS**: [zCOSMOS honlap](#), [referencia publikáció \(2007\)](#). Két fő spektroszkópiai felmérés:
 - o zCOSMOS-bright: cél: 20000 megmért vöröseltolódás; $> 1,7 \square^\circ$, $I_{AB} < 22,5$.
 - o zCOSMOS-deep: cél: 10000 megmért vöröseltolódás; $> 1,0 \square^\circ$, $I_{AB} < 24,0$ nominális, színi válogatással.

12.6.2. Felmérések más hullámhossz sávokban:

- QMC-Cambridge-Durham (QCD) Redshift Survey: 2800 megmért vöröseltolódás; $>34000 \text{ } \square^\circ$, 60 micron flux $> 0,6$ Jansky (subset of PSCz); [referencia publikáció \(1990\)](#).
- IRAS PSCz Redshift Survey: 15000 megmért vöröseltolódás; $>34000 \text{ } \square^\circ$, 60 micron flux $> 0,6$ Jansky; [referencia publikáció \(2000\)](#).
- **WiggleZ**: 250000 megmért vöröseltolódás; $>1000 \text{ } \square^\circ$, GALEX NUV $< 22,8$ válogatás (FUV - NUV $> 1,5$ & $20,5 < r < 22,5$); [WiggleZ honlap](#), [referencia publikáció \(2008\)](#).

12.6.3. Kisebb és kevésbé mély felmérések (N<5000):

- Anglo-Australian Redshift Survey (AARS): 330 megmért vöröseltolódás; $>70 \text{ } \square^\circ$; $b_J < 17,0$; [referencia publikáció \(1986\)](#).
- **Autofib** Redshift Survey: 1000 megmért vöröseltolódás; $>5,5 \text{ } \square^\circ$; $b_J < 22,0$; [referencia publikáció \(1996\)](#).
- **CfA** Redshift Survey: 2400 megmért vöröseltolódás; $>9000 \text{ } \square^\circ$, $B < 14,5$ (subset of CfA2); [referencia publikáció \(1982\)](#).
- Durham-UKST Redshift Survey (**DURS**): 2500 megmért vöröseltolódás; $>1500 \text{ } \square^\circ$, $b_J < 17,0$; [DURS honlap](#), [referencia publikáció \(1996\)](#).
- Eso Slice Project (**ESP**): 3300 megmért vöröseltolódás; $>23 \text{ } \square^\circ$, $b_J < 19,4$; [ESP honlap](#), [referencia publikáció \(1997\)](#).
- Hawaii+AAO (**H-AAO**) K-Band Redshift Survey: 1050 megmért vöröseltolódás; $>8,2 \text{ } \square^\circ$, $K < 15,0$; [referencia publikáció \(2003\)](#).
- Kitt Peak Galaxy Redshift Survey (**KPGRS**): 328 megmért vöröseltolódás; $>1,3 \text{ } \square^\circ$, $R_F < 19,0$; [referencia publikáció \(1997\)](#).
- Stromlo-APM (**SAPM**) Redshift Survey: 1800 megmért vöröseltolódás; $>4300 \text{ } \square^\circ$, $b_J < 17,15$ (only 1 in 20 sampling); [SAPM honlap](#), [referencia publikáció \(1992\)](#).

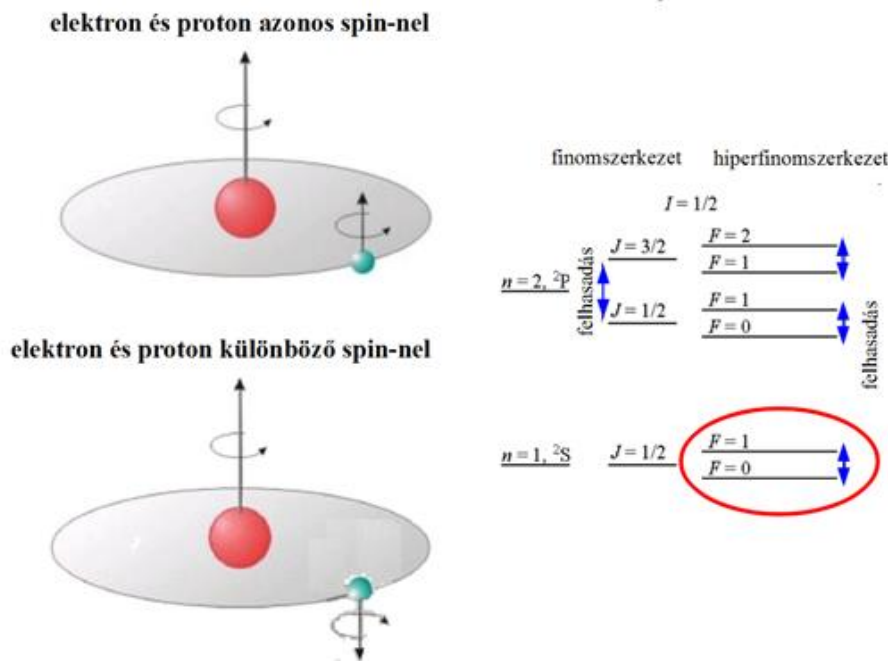
12.6.4. További mély felmérések:

- Canada-France Redshift Survey (**CFRS**): 700 megmért vöröseltolódás; $>0,14 \text{ } \square^\circ$, $I_{AB} < 22,5$; [CFRS honlap](#), [referencia publikáció \(1995\)](#).
- **DEEP** Groth Strip Galaxy Redshift Survey: 658 megmért vöröseltolódás; $>0,03 \text{ } \square^\circ$, $V < 24$; [referencia publikáció \(2005\)](#).
- FORS Deep Field (**fdf**) spectroscopic survey: 341 megmért vöröseltolódás; $>0,014 \text{ } \square^\circ$, $I < 25$ nominal; [referencia publikáció \(2004\)](#).
- Gemini Deep Deep Survey (**GDDS**): 225 megmért vöröseltolódás; $>0,03 \text{ } \square^\circ$, $K < 20,6$ & $I < 24,5$ with color selection; [GDDS honlap](#), [referencia publikáció \(2004\)](#).
- **K20** survey: 500 megmért vöröseltolódás; $>0,014 \text{ } \square^\circ$, $K < 20,0$; [K20 honlap](#), [referencia publikáció \(2005\)](#).
- Lyman Break Galaxies at $z \sim 3$ (**LBG-z3**) Keck felmérés: 940 megmért vöröseltolódás; $>0,38 \text{ } \square^\circ$, $R_{AB} < 25,5$ szín szerinti válogatással; [referencia publikáció \(2003\)](#).
- **MUNICS**: 500 megmért vöröseltolódás; $>0,17 \text{ } \square^\circ$, $K < 17,5$ ($0,03 \text{ } \square^\circ$ to $K < 19,0$); [MUNICS honlap](#), [kapcsolódó publikáció \(2003\)](#).

- Team Keck Redshift Survey (TKRS): 1440 megmért vöröseltolódás; $>0,04 \square^\circ$, $R_{AB} < 24,4$; referencia publikáció (2004).

12.7. A HI 21cm-es spektrumvonal

A semleges hidrogén galaktikus rádiósugárzásának felfedezése Jan Oort kezdeményezése volt. Oort, a Leideni Egyetem iskolateremtő professzora a Tejútrendszer korongjának szerkezetét igyekezett felderíteni és modellezni, de csak a Naprendszer környezetéből álltak rendelkezésre adatok, mert a Galaktikus korong távoli vidékeit poros csillagközi anyag takarja. Kezdeményezésére doktori hallgatója, Hendrik C. van de Hulst tanulmányozta a leggyakoribb elem, a hidrogén lehetséges rádiósugárzásának elméletét. 1944-ben tartott leideni előadásában egy a hidrogén hiperfinom szerkezetében nagyon kis spontán átmeneti valószínűséggel ($A=2.88 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1} \approx 1/10^7 \text{ év}$) végbemenő átmenetről mutatta meg, hogy azt elvileg mérhetnénk a Galaxisból kb. 21cm hullámhosszon (van de Hulst 1945). A 12.7. ábrán bemutatott klasszikus analógia a perdülettel csak szemléltetésre alkalmazható, de jelzi az elméleti hátteret. A hidrogén atom protonjának és elektronjának is kvantummechanikai impulzus momentumot tulajdonítva egy adott spin állapot hiperfinom állapotokra bomlik a proton és az elektron spin-ek szerint. Az alapállapotú ($1s^2S_{1/2}$) hidrogén atom nagyobb sajátenergiájú parallel és a kisebb energiájú anti-parallel hiperfinom állapotai közti energiakülönbség $E = 5.9 \times 10^{-6} \text{ eV}$. Ebből az állapotok közti $n=1$ $F=1-0$ átmenetkor kibocsátott sugárzás frekvenciája: 1420.4058 MHz.



12.7. ábra: A hidrogén atom energiaállapotai. A baloldalon az alapállapotú hidrogén atom, mag spin és elektron spin szerinti magasabb (fent) és alacsonyabb energiaszintű, azaz parallel és anti-parallel állapotai. A jobb oldalon az alapállapot $1s^2S_{1/2}$ és az első gerjesztett elektronállapot $2P$ felhasadásait mutatjuk be. Az alapállapotban nincs spin-pálya kölcsönhatás miatti finomszerkezet.

A hidrogéngáz felhőkbe rendeződik. Egy-egy csillagközi hidrogén felhő 21cm-es spektrumvonalát radiális sebességének megfelelő Doppler eltolódással mérjük. A spektrumvonal kiszélesedését a felhő atomjainak hőmérsékleti mozgása, turbulens mozgások, illetve kisebb felhődarabok mozgásai és esetenként áramlások, és az ezen belső mozgások miatt fellépő Doppler eltolódás okozzák. A galaktikus HI 21cm-es sugárzás többnyire (de nem mindig) optikailag vékony ($\tau \ll 1$) közegből érkezik. A ΔT_B háttérre és előtérre korrigált fényességi hőmérsékletnek a km/s-ban mért v Doppler sebesség szerinti integrálja, azaz a spektrumvonal alatti területből

egyszerűen becsülhető a hidrogén gáz cm^{-2} -ben mért $N(H)$ oszlopsűrűsége. A gerjesztést jellemző T_s spinhőmérsékletet az $F=1$ és $F=0$ állapotú hidrogén atomok relatív számát megadó Boltzmann egyenlet a g_1 és g_0 statisztikus súlyokkal a következőképpen definiálja:

$$\frac{N_{F=1}(H)}{N_{F=0}(H)} = \frac{g_1}{g_0} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_s}\right) = 3 \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_s}\right) \quad \text{kihasználva, hogy } g_1 = 3g_0 \quad (12.9)$$

Itt jegyezzük meg, hogy természetesen a teljes semleges hidrogén oszlopsűrűsége:

$$N(H) = N_{F=1}(H) + N_{F=0}(H) \quad (12.10)$$

Tipikus spinhőmérsékleteknél a (12.9) egyenlet exponenciális tényezője lineárisan közelíthető:

$$\exp\left(-\frac{h\nu}{kT_s}\right) = \exp\left(-\frac{0,068K}{T_s}\right) \approx 1 - \frac{0,068K}{T_s} \quad \text{kihasználva, hogy } T_s > 10K \quad (12.11)$$

Ahonnán (12.9) és (12.10) felhasználásával:

$$N(H) = 3\left(1 - \frac{0,068K}{T_s}\right) N_{F=0}(H) + N_{F=0}(H) \approx 4N_{F=0}(H) \quad (12.12)$$

Az optikai mélységet az $A_{1,0}$ Einstein együtthatóval és az $F=0$ állapotú atomok számával ki tudjuk fejezni. Az oszlopsűrűséget a következő integrál adja:

$$N(H) = 1,8 \times 10^{18} \int_{v_1}^{v_2} T_s \tau_v dv \quad \text{ahol } T_s \text{ a spinhőmérséklet} \quad (12.13)$$

$$\square T_B = (T_s - T_{\text{háttér}}) [1 - \exp(-\tau_v)] \quad \text{a háttérre korrigált fényességi hőmérséklet} \quad (12.14)$$

$$\text{Ha } T_s \square T_{\text{háttér}} \text{ és, akkor: } \tau_v \square 1 \quad (12.15)$$

$$N(H) = 1,8 \times 10^{18} \int_{v_1}^{v_2} \square T_B dv \quad (12.16)$$

Itt $\square T_B$ mérhető, és az oszlopsűrűség az adott $[v_1, v_2]$ sebesség intervallumban sugárzó hidrogén gázra kiszámítható.

12.8. Kémiai összetétel, vas-hidrogén index

A csillagok, a csillagközi anyag összetétele fizikai és kémiai folyamatok eredménye, az összetételt ezen folyamatok megértése céljából is vizsgáljuk.

A *kémiai összetétel* alatt általában az anyagot alkotó atomok arányát értjük, azaz elemi összetételt. Van, amikor egy keverékben molekulák relatív gyakoriságát vizsgáljuk. Kőzetek esetében azokat ásványaikra bontva *ásványi összetételről*, egy adott elem különböző tömegszámú izotópjainak arányát vizsgálva *izotópos összetételről* beszélünk. Az analitikai kémia gazdag eszköztárából a csillagászatban a Naprendszer kutatását leszámítva a csak a spektroszkópia áll rendelkezésünkre. Az anyagi összetétel csillagászati mérése máskülönben hasonlatos az analitikai kémia laborvizsgálataivalhoz, hiszen mindkét esetben a folyamat lépései a következők: (1) stimulus, (2) a minta választ ad, (3) a választ mérőeszközzel detektáljuk, (4) jel erősítés és digitalizálás, (5) kiolvasás. A csillagász által elemzett közegekben, a kémiai laborokhoz hasonlóan a stimulus lehet sugárzás, hő vagy mechanikai hatás, a különbség csak az, hogy ezeket a hatásokat nem a mérést végző kelti, sőt leggyakrabban a hatásokat is fel kell fedezze. A minta mért válasza alapvetően sugárzás, ennek spektrumából az összetétel mellett több fizikai paraméter (hőmérséklet, sűrűség) megbecsülhető. Tekintettel arra, hogy a csillagász a látóirányába eső sugárzást méri, ebben nem csak a cél objektum, hanem az előtér és a háttér sugárzása is jelen van. A kémiai összetétel megállapításakor ezért a sugárzó közegek egyfajta modelljeit is kell használni. Tehát például a csillagok spektrumából nem közvetlenül származtatunk kémiai összetételt, hanem megfelelő légkörmodellek alkalmazásával. Hasonlóan ehhez, csillagközi

felhők mm-es és szub-mm-es spektrumában megjelenő vonalak közvetlenül csak a sugárzó molekulák jelenlétét jelzik, kvantitatív megállapításokat csak egy analitikus, vagy numerikus (pl. ray-tracing, vagy Monte Carlo) modellezés után tehetünk.

Ebben a fejezetben a Galaxis kémiai összetételét tárgyaljuk. Az összetételt lehet az atomok számarányával, vagy tömeg arányával jellemezni. Az X , Y , Z relatív gyakoriságokat a teljes tömeg arányában adjuk meg (lásd 12.17.-12.3. egyenletek).

$$X = \frac{M(H)}{M_{\text{tejes}}}; \quad (12.17)$$

$$Y = \frac{M(He)}{M_{\text{tejes}}} \quad (12.18)$$

$$Z = \frac{M_{\text{tejes}} - (M(H) + M(He))}{M_{\text{tejes}}} \quad (12.19)$$

Összehasonlíthatjuk az egyes elemek atomjainak számát a hidrogén atomok számával, például a héliumét:

$$\text{gyakoriság} = \frac{n(He)}{n(H)} \quad (12.20)$$

Az egyes héliumnál nagyobb rendszámú elemek atomjainak számát, a hidrogén atomok számával összevetve kapjuk a *fémesség* értékét. Leggyakrabban a vas atomszámot használjuk, és ezzel írjuk fel az úgynevezett *vas-hidrogén index*-et, ami a csillag Naphoz viszonyított relatív vastartalmának 10-es alapú logaritmus:

$$[Fe/H] = \log_{10} \left(\frac{n(Fe)}{n(H)} \right)_{\text{csillag}} - \log_{10} \left(\frac{n(Fe)}{n(H)} \right)_{\text{Nap}} \quad (12.21)$$

$$[O/Fe] = \log_{10} \left(\frac{n(O)}{n(Fe)} \right)_{\text{csillag}} - \log_{10} \left(\frac{n(O)}{n(Fe)} \right)_{\text{Nap}} \quad (12.22)$$

A (12.22.) egyenlet pedig az oxigén relatív gyakoriságát leíró oxigén-vas indexet adja meg.

12.9. A Hubble típusok gyakorisága Marik (1989) szerint:

Hubble vizsgálata idején a leginkább homogén, publikált anyag a Franklin-Adams-féle térképeken alapuló jegyzék volt, amely az összes 12 magnitúdónál fényesebb galaxist és néhány halványabbat is tartalmazott. Ezek közül négyszázat klasszifikált az amerikai csillagász, és a látszólagos gyakoriságokra a következőt kapta.

A többi főbb típusok aránya a teljes mintához viszonyítva: elliptikus 23%, normál spirál 59% és küllős spirál 15%, és 3% szabálytalan.

Az E0 E1 E2 E3 E4 E5 E6 E7 elliptikus osztályok relatív gyakorisága rendre: 18% 14% 15% 11% 14% 6% 8% 5%, továbbá 9% különleges, pekuláris elliptikus.

Spirál Sa Sb Sc Pec SBa SBb SBc Pec galaxisok relatív gyakorisága rendre: 21% 29% 49% 1% 44% 27% 26% 3%.

A Hubble által megadott gyakoriságértékek csupán annyit jelentenek, hogy a vizsgált területeken az adott látszólagos fényességhatárig megfigyelhető ködfoltok típusonként megoszlása éppen ilyen volt. Az egyik lehetséges megoldás ma is az, hogy határfényességgel megadott mintát tanulmányoznak. Ez azt jelenti, hogy a nagyobb abszolút fényességű objektumok sokkal messzebről belekerülnek a mintába, mint a halványabbak, s így a kapott

gyakoriságok nem térfogategységre vonatkoznak. A másik – Hubble idejében még járhatatlan – út az, amikor galaxishalmazok populációját tanulmányozzák. Az így kapott eredmények, amennyiben valóban sikerült különválogatni a halmaztagokat a háttérgalaxisoktól, továbbá sikerült valamennyi tag klasszifikációját elvégezni, már a világmindenség egy nagy sejtjének, az illető halmaznak galaxistípusok szerinti összetételét adják meg.

Referenciák és további olvasnivaló a függelék témáiban:

Bessel, M.S. 1990: „*UBVRI passbands*”, [PASP..102.1181B](#)

Bessel, M.S. 2005: „*Standard Photometric Systems*”, [ARA&A..43..293B](#)

Cirasuolo, M., et al. 2011: „*MOONS: The Multi-Object Optical and Near-infrared Spectrograph*”, <http://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.145-sep11/messenger-no145-11-13.pdf>

Gerhátné Udvary E., 2011: „*Az optikai hálózatok alapjai (BMEVIHVJV71) Optikai vevő*”, http://hvt.bme.hu/~udvary/OptHal/04_PD.pdf

Girardi, L. et al. 2004: „*Theoretical isochrones in several photometric systems II. The Sloan Digital Sky Survey ugriz system*”, [A&A 422, 205](#)

Huchtmeier, W. et al. 1995: „*Neutral hydrogen observations of elliptical galaxies. II. The IRAS sample*”, [A&A...300..675H](#)

Johnson, H.L. & Morgan, W.W., 1953: „*Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the Yerkes spectral atlas*”, [ApJ...117..313J](#)

Marik, M., 1989: „*Csillagászat*”, Budapest, Akadémiai kiadó

McClure, R. & van den Bergh, S. (1968): „*Five-Color Intermediate-Band Photometry of Stars, Clusters and Galaxies*”, [Astronomical Journal, Vol 73, Nr. 5, Part 1, p. 313](#)

McClure, R. 1975: „*Standard Stars for DDO photometry*”, [Astronomical Journal, Vol 81, Nr. 3, p. 103](#)

Snell, R. 2012: „*AST741- Interstellar Medium*”, <http://www.astro.umass.edu/~snell/lectures741.html>

van de Hulst, H.C. 1945: „*Radio Waves from Space: Origin of Radiowaves*”, [Ned. tijds. natuurkunde, 11, 210](#) – holland nyelvű cikk, angol fordítása a következő könyvben található: W.T. Sullivan, III, ed., *Classics in Radio Astronomy* (D. Reidel, Dordrecht, 1982)

13. fejezet - Animációk

13.1. Az Ia típusú szupernóva fénygörbe illesztése – interaktív

- fájl: SNIa_fenygorbe_unl_edu.swf
- lásd 2. fejezet

13.2. A hidrogén atom energiaszintjei – interaktív

- fájl: unl_edu_hydrogen_atom_interaktiv.swf
- lásd 12. fejezet

13.3. Szupernóva a NGC1365 galaxisban

- fájl: supernova_NGC1365potw1323b.mpg
- lásd 2. fejezet

13.4. A Centaurus A óriás elliptikus galaxis

- fájl: Centaurus A_eso0944a.mp4
- fájl: Centaurus A_eso1221b.mpg
- lásd 4. fejezet

13.5. Az NGC253 „Sculptor” spirálgalaxis

fájl: NGC253_Sculptor_spiralgalaxis_eso0902a.mp4

fájl: NGC253_Sculptor_spiralgalaxis_lathato_infravoros_eso1025b.mpg

lásd 5. fejezet

13.6. A Pinwheel galaxis 4 hullámsávbán

- fájl: PinwheelGalaxyMultiwavelength.mp4
- lásd 5. fejezet

13.7. Az M81 és fényes nukleusza

fájl: m81_kompozit_fenyos_nukleusz.mp4

lásd 5. és 10. fejezet

13.8. Az M83 látható és infravörös képei

- fájl: M83_lathato_infravoros_eso1020c.mpg
- lásd 5. fejezet

13.9. Az NGC 7424 Seyfert 1 galaxis

fájl: Seyfert 1 galaxy NGC 7424_eso.mpg

lásd 10. fejezet

13.10. Az NGC 1313 starburst galaxis

- fájl: starburst galaxy_NGC 1313_eso.mpg
- lásd 9. fejezet

13.11. A Nagy Magellán Felhő LMC

- fájl: LMC_eso1021a.mpg
- lásd 6. fejezet

13.12. Az NGC 6872-IC 4970 kölcsönható galaxisok

fájl: kolcsonhato_NGC 6872-IC 4970_eso.mpg

lásd 9. fejezet

13.13. Az NGC6769-NGC6770 hármasrendszer

fájl: harnasrendszer-ngc6769-ngc6770.mpg

lásd 9. fejezet

13.14. Az M51 spirálgalaxis

- fájl: M51_WWT_lg_web.mov
- lásd 5. fejezet