

Litbrigði og þróun vetrarbrautaþyrpinga

Vilhelm S. Sigmundsson¹, Einar H. Guðmundsson² og Eelco van Kampen³

¹Verslunarskóli Íslands, ²Raunvísindastofnun Háskólans og ³University of Innsbruck

Vefútgáfa: 7. október 2005

Ágrip – Mælingar með Norræna sjónaukanum á lit vetrarbrauta í þyrpingum eru notaðar til þess að varpa ljósi á myndun þyrpinganna. Svonefnt $U - R$ litar-birtu línurit (e. colour-magnitude diagram) dregur vel fram stjörnumyndunarvirgni vetrarbrauta. Samanburður á slíkum línuritam fyrir þyrpingar með mismunandi rauðvík gefur mikilvægar upplýsingar um þróun þessara fyrirbæra.

1. Inngangur

Þyrpingar vetrarbrauta (e. clusters of galaxies) og reginþyrpingar (e. superclusters) eru stærstu fyrirbæri alheims. Okkar eigin vetrarbraut og grannhópur liggja í útjaðri Virgo-þyrpingarinnar sem hefur að geyma meira en tju þúsund vetrarbrautir. Við erum reyndar að falla í átt að miðju hennar, í um 70 milljón ljósára fjarlægð, með um 250 km/s hraða. Aðrar nálæggar þyrpingar eru sumar hverjar enn stærri, til dæmis Coma-þyrpingin og Hydra-Centaurus-þyrpingin.

Myndun og þróun þessara risavöxnu fyrirbæra var löngum talsverð ráðgáta. Á sjöunda áratug síðustu aldar voru það einkum tvær kenningar sem voru til umræðu. Sovétmenn með Yakov Zeldovich í broddi fylkingar héldu fram þeirri hugmynd að vetrarbrautir og þyrpingar hefðu myndast við sundrun gríðarstórra efnisökkja (svonefndra Zeldovich pönnukaka) og að þróunin hefði því verið "úr stóru í smátt", ef svo má segja. Á Vesturlöndum hölluðust menn frekar að þeirri hugmynd að þyrpingar mynduðust úr smærri einingum sem rynnu saman með tímanum, þannig að þróunin væri "úr smáu í stórt". Þetta byggðist fyrst og fremst á því að svo virðist sem slík þróun sé enn í gangi í nágrenni okkar. Við sjáum þyrpingar stækka þegar þær sópa til sín sífellt fleiri vetrarbrautum.

Á síðustu árum hafa línur skýrst mjög hvað þetta varðar, einkum vegna nýrra gagna. Komið hefur í ljós að venjulegt efni (róteindir, nifteindir og rafeindir) er aðeins örlítil hluti þess massa sem til staðar er í geimnum og að meginhluti hans er í hinu svonefnda hulduefni. Það er því dreifing huldufnisins

sem ákvarðar dreifingu hins venjulega efnis, sem er eins og froða innan um hina raunverulegu massadreifingu alheimsins – þyrpingar vetrarbrauta safnast ekki saman af sjálfu sér heldur falla þær inn í djúpa mættisbrunna huldufnis. Þær eru líkt og toppurinn á ísjakanum, ásýnd undirliggjandi massadreifingar sem ekki sést, en ákvarðar engu að síður stórgerð alheimsins. Þyrpingar vaxa alla jafna með því að sópa til sín vetrarbrautum af víðavangi sem falla ofan í mættisbrunna huldufnisins og sameinast þyrpingunum, sem verða þannig sífellt stærri og massameiri og eiga fyrir vikið enn auðveldara með að stækka. Þetta er í stórum dráttum hið viðtekna líkan af þróun vetrarbrautaþyrpinga sem mótast hefur á síðustu árum.

Þegar vetrarbrautir á víðavangi falla í átt að stórra þyrpingu verða þær fyrir ýmiss konar áhrifum sem fyrst og fremst koma fram í stjörnumyndunarvirgni, en stjörnumyndun er mjög næmt mælitæki á innra ástand vetrarbrauta. Einkum er um þrenns konar áhrif að ræða: Sjávarfallahrif, árekstra og gastap. Áhrifa sjávarfallakrafta tekur að gæta strax í útjaðri þyrpingar og geta þeir raskað hinu viðkvæma jafnvægi sem ríkir í gasþokum milli eigin þyngdar og þrýstingsstiguls. Gasþokurnar taka þá að falla saman og nýmyndun stjarna eykst. Þetta eru oft fyrstu merkin um það að eitthvað óvenjulegt sé að gerast í þyrpingunni. Innfallandi vetrarbrautir geta einnig lent í beinum árekstrum við aðrar innfallandi vetrarbrautir í útjaðri þyrpinga og jafnvel runnið saman við þær því mishraði vetrarbrautanna er enn tilölulega lítil (samruni vetrarbrauta á miðju þyrpinga er hins veg-

ar ólíklegur vegna hins mikla hraða sem þar er um að ræða).

Allt veldur þetta því að svonefnd stjörnumyndunarhrina (e. starburst) getur hafist, en þá verður nýmyndun stjarna margfalt tíðari en í venjulegum vetrarbrautum, um eða yfir hundrað sólmassar á ári í stað eins sólmassa á ári í okkar vetrarbraut. Um gríðarlegar hamfarir er því að ræða og sem dæmi má nefna að tíðni sprengistjarna margfaldast og birta vetrarbrautar í þessu ástandi verður mun meiri en venjulegra vetrarbrauta og liturinn blárrí.

Stjörnumyndunarhrinan er tiltölulega stutt, því að gasforði venjulegrar vetrarbrautar gengur til þurrðar á nokkur hundruð milljón árum við slíkar aðstæður. En ef um innfallandi vetrarbrautir er að ræða stöðvast þó stjörnumyndunin snögglega þegar vetrarbrautin fellur dýpra ofan í þyrpingarmiðjuna og rekt þar á heitt og þétt þyrpingargasið (hitinn er 10^6 – 10^7 K). Afleiðingin er sú að gasið þrýstist út úr vetrarbrautinni, samlagast þyrpingargasinu og hitnar. Stjörnurnar verða hins vegar eftir og "stjörnubeinagrind" vetrarbrautarinnar heldur áfram að falla í átt að miðju þyrpingarinnar með sívaxandi hraða. Þegar hér er komið sögu er vetrarbrautin óþekkjanlegt safn gamalla rauðleitra stjarna og ekki er um neina nýmyndun stjarna að ræða. Að lokum verða örlög hennar þau að sveima fram og aftur um þetta miðju þyrpingarinnar og sameinast henni smám saman vegna orkutaps af völdum sjávarfallakrafta.

Á þennan hátt vaxa þyrpingar smám saman og má sjá þess stað í nálægum þyrpingum sem lengra eru á veg komnar í þessari þróun en þær sem fjarlægari eru. Í þessu sambandi verður að hafa í huga að vegna endanlegs ferðatíma ljóssins virðast þyrpingarnar sífellt yngri eftir því sem þær eru lengra í burtu. Fyrstu vísbandingar um þessa þróunarsögu komu fram í mælingum stjörnufræðinganna H. Butchers og A. Oemlers fyrir um 25 árum (Butcher og Oemler, 1980). Hin svonefndu Butcher-Oemler hrif felast í því að hlutfall blárra vetrarbrauta er hærra í fjarlægum þyrpingum en nálægum, en eins og áður sagði er það einmitt litur vetrarbrauta sem endurspeglar innra ástand þeirra með tilliti til stjörnumyndunar og gasforða. Ef um nýmyndun stjarna er að ræða, fylgir massadreifing þeirra venjulega hinu svonefnda upphafsmassafalli (e. Initial Mass Function), þ.e. margar léttar stjörnur myndast en færri hámassastjörnur. En hinar síðarnefndu eru gríðarlega bjartar, heitar og blá-

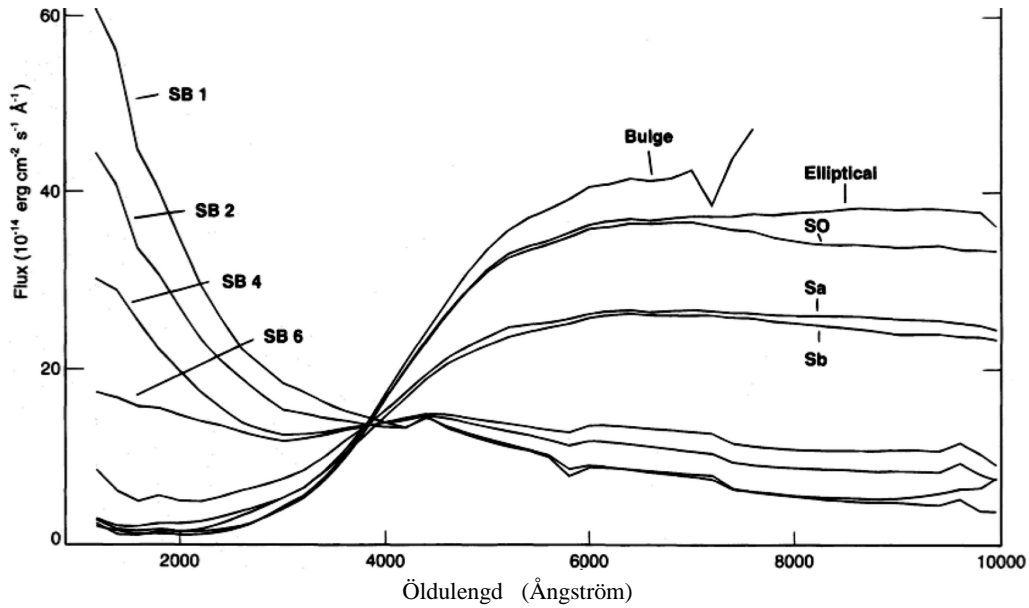
leitar og yfirgnæfa útgeislun vetrarbrauta þrátt fyrir að fjöldi þeirra sé ekki mikill (innan við 3% þeirra stjarna sem myndast). Þessar massamiklu stjörnur eru mjög skammlífar og springa sem sprengistjörnur af gerð II áður en þær komast langt frá myndunarstað sínum. Það má því álykta sem svo að bláleitar stjörnur sé aðeins að finna í þeim vetrarbrautum þar sem umtalsvert gas er enn til staðar og stjörnumyndun fer fram. Litur er því einkennandi fyrir ástand vetrarbrauta og stjörnumyndunarvirkni.

2. Mælingar með Norræna sjónaukanum

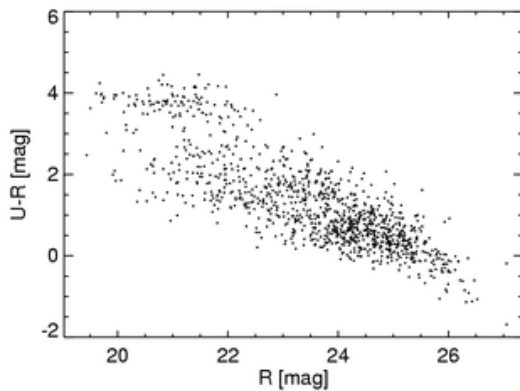
Íslenskir stjarnvísindamenn hafa á undanförunum árum notað Norræna stjörnusjónaukann á La Palma til ýmissa rannsókna á þyrpingum vetrarbrauta. Fjórar fjarlæggar og stórar þyrpingar hafa verið kannaðar til þessa. Upphaflega var um að ræða mælingar á veikum þyngdarlinsuhrifum (Rögnvaldsson et al. 2001, Dye et al. 2002) en síðar var ákveðið að vinna frekar úr mæligögnunum í tengslum við Hugvísisverkefni fjögurra nemenda við MR árið 1999. Þá kom í ljós að þróun vetrarbrauta endurspeglar mjög vel í svonefndum $U - R$ lit þeirra, þar sem U er birtustig á útbláa sviðinu og R á því rauða. Ástæðan er einkum sú að U -borðinn er mjög næmur fyrir nýmyndun stjarna. Liturinn $U - R$ (birta á U -borðanum mínus birta á R -borðanum) er mælikvarði á hlutfallslegan styrk stjörnumyndunar: Ef $U - R$ er lág tala (t.d. undir 2) er vetrarbrautin bláleit og þar á sér stað mikil stjörnumyndun, en ef $U - R$ er há tala (~ 4) eru rauðar, gamlar stjörnur mest áberandi. Þetta sést vel hjá nálægum vetrarbrautum sem eru að ganga í gegnum stjörnumyndunarhrinu. Dæmigert litróf slíkra vetrarbrauta hefur áberandi topp í útbláu (sem kemur fram á U -borðanum) samanborið við róf sporvöluvetrarbrauta þar sem stjörnumyndunar gætir lítt (mynd 1).

Línurit með $U - R$ lit sem fall af birtu R fyrir dæmigerða þyrpingu (mynd 2) sýnir áberandi tvískiptingu. Rauði klasinn við $U - R \approx 4$ eru gassnauðar sporvölur og S0 vetrarbrautir innarlega í þyrpingunni. Björtustu vetrarbrautirnar eru þeirra á meðal, hinar gríðarlega massamiklu cD vetrarbrautir sem myndast hafa við samruna margra vetrarbrauta í þyrpingarmiðjunni. Bláu vetrarbrautirnar ($U - R \approx 2$ og þar fyrir neðan) eru innfallandi þyrilvetrarbrautir, gasauðugar með áberandi stjörnumyndun.

Mikilvægt er að hafa í huga að við mælingar er sjónaukanum beint út í þrívíðan geim, þannig að á



Mynd 1. Ljósstyrkur (flux) sem fall af bylgjulengd fyrir ýmsar tegundir vetrarbrauta. Glögglega má sjá að meginþorri útgeislunar frá sporvöluþöku (Elliptical) er í rauða hluta litrófsins enda er nýmyndun stjarna nánast engin í þeim vetrarbrautum. Eftir því sem stjörnumyndun verður meira áberandi (SO, Sa og Sb vetrarbrautir) verður hlutfallslega meiri ljósstyrkur í bláa hluta litrófsins og í vetrarbrautum þar sem stjörnumyndunarhrina gengur yfir (SB1 til SB6) er mestur hluti útgeislunar á útbláa sviðinu. (Kinney et al., 1996).



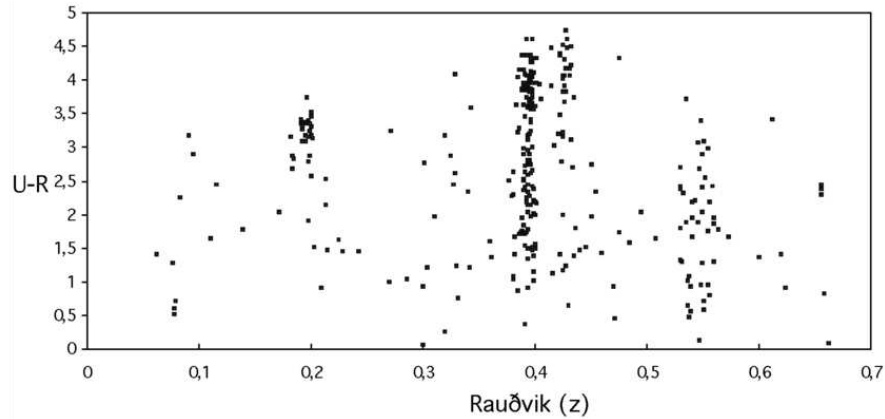
Mynd 2. $U - R$ litur sem fall af R birtu fyrir þyrpinguna CL0024. Vetrarbrautir þyrpingarinnar skiptast greinilega í rauðan klasa með $U - R$ í kringum 4 og bláar vetrarbrautir með lægri gildi á $U - R$. Fjöldi daufra blárra vetrarbrauta er með $U - R \approx 0$, en margar þeirra eru líklega í forgrunni þyrpingarinnar og því ekki hluti af þyrpingunni sjálfri.

mynd 2 er að finna allar vetrarbrautir sem lenda í sjónlínu frá okkur að umræddri þyrpingu og áfram svo langt sem augað eygir. Þarna er því bæði um að ræða hinar eiginlegu þyrpingarvetrarbrautir sem og fjölda

vetrarbrauta sem liggja í forgrunni og bakgrunni. Til að skilja þarna á milli þarf frekari upplýsingar um fjarlægð vetrarbrautanna frá okkur. Fjarlægðin eykst með vaxandi rauðviki, en það má mæla með litrófsaðferðum.

Fyrir þyrpingarnar fjórar sem við höfum rannsakað notum við mælingar á rauðviki sem finna má í opnum gagnasöfnum stjarnfræðinga. Þannig veljum við úr þær vetrarbrautir sem greinilega tilheyra þyrpingunum. Oftast eru þó aðeins fáar vetrarbrautir í hverri þyrpingu, sem hafa þekkt rauðvik því um er að ræða erfiðar og tímafrekar mælingar. Í þessu verkefni höfum við valið þær þyrpingar sem hvað mest hafa verið rannsakaðar í þessu tilliti og fyrir hverja þeirra er fjöldi vetrarbrauta með þekkt rauðvik á bilinu 50 til 500. Aðeins lítil hluti þeirra sést þó einnig í mælingum okkar og gildir það bæði um U og R borða. Fáar vetrarbrautir tilheyra því öllum þremur gagnasöfnum (rauðvik, U , R).

Þegar upp er staðið er fjöldi staðfesta þyrpingarvetrarbrauta því lítil miðað við þann fjölda sem sjá má á mynd 2. Hins vegar koma fram ýmis áhugaverð atriði ef teiknað er línurit af lit þeirra ($U - R$) sem fall af rauðviki (z), eins og sýnt er á mynd 3.



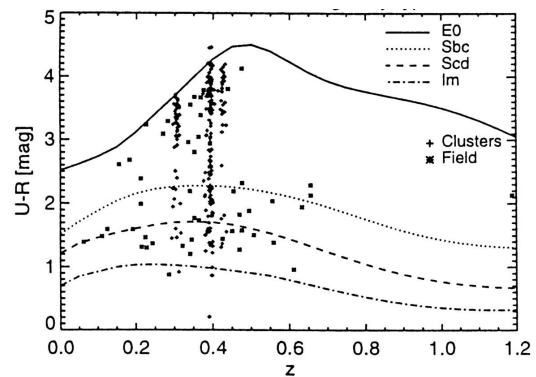
Mynd 3. Litur ($U - R$) sem fall af rauðviki fyrir allar vetrarbrautir með þekkt rauðvik í gagnasafni okkar. Þyrpingarnar eru áberandi rauðleitari (hafa hærra $U - R$ gildi) en vetrarbrautir í forgrunni og bakgrunni.

Helstu niðurstöður eru þessar:

- Þyrpingar eru áberandi rauðar miðað við vetrarbrautir í forgrunni og bakgrunni. Rauðustu vetrarbrautirnar eru að jafnaði í þyrpingum vetrarbrauta.
- Talsverðan fjöldi blárra vetrarbrauta er að finna í þyrpingum og er líklegt að um sé að ræða innfallandi þyrilvetrarbrautir, því bláar vetrarbrautir finnast vart í nálægum þyrpingum. Telja má líklegt að þessar vetrarbrautir verði að SO vetrarbrautum sem verða sífellt meira áberandi eftir því sem nær okkur dregur í tíma og rúmi.
- Sjá má geil í þéttleika mælipunkta milli blárra og rauðra vetrarbrauta í þyrpingum, sem bendir til þess að vetrarbrautir breytist tiltölulega fljótt úr bláum innfallandi vetrarbrautum í rauðar gassnaðar vetrarbrautir. Það gerist sennilega þegar þær rekast á þyrpingargasið og missa gasforða sinn, þannig að stjörnumyndun þeirra hættir skyndilega.

3. Reiknilíkön

Samhliða mælingunum, sem rætt er um hér að framan, höfum við unnið að gerð ítarlegra reiknilíkana um lit og þróun vetrarbrautapýrpinga í heimi í útþenslu (van Kampen et al. 2005). Þar er tekið fullt tillit til huldufnis og hulduorku sem og fjölmargra eðlisfræðilegra þátta. Sem dæmi um niðurstöður sýnir mynd 4 hvernig $U - R$ litur ýmissa tegunda vetrarbrauta breytist með rauðviki í heimslíkani sem fellur vel að okkar heimi. Mjög gott samsæmi er milli mælinga okkar og reiknilíkansins, sér í lagi hvað varðar rauðar sporvölupokur.



Mynd 4. Ferlarnir sýna útreiknaða þróun $U - R$ litar með rauðviki (z) fyrir ýmsar tegundir vetrarbrauta. Rauðar sporvölur eru efst en bláar þyrilvetrarbrautir neðst. Enn fremur má sjá tilsvarende mælingar fyrir þyrpingarnar MS 1008 ($z=0.30$), CL 0024 ($z=0.39$) og MS 1621.5 ($z=0.43$).

Niðurstöður reiknilíkansins sýna að bil eða geil milli rauðra og blárra vetrarbrauta í $U - R$ línuriti þyrpinga, líkt og sjá má á mynd 3, er eðlileg afleiðing af þróun. Þær vetrarbrautir sem þó eru í geilinni eru væntanlega þær sem eru að þróast yfir í rauða hópinn. Vænta má að þyrilvetrarbraut sem fellur inn í þyrpingu verði fyrst bláari meðan stjörnumyndunarhrinin stendur yfir en færast síðan tiltölulega hratt yfir í hóp rauðra vetrarbrauta, þegar hún rekst á þétt þyrpingargasið. Athygli vekur að geilin færast upp og niður með rauðviki í samræmi við útreiknaðan feril. Hér er um að ræða sambland af eiginlegri þróun annars vegar og hins vegar því að mismunandi hlutar litrófs sjást við mismunandi rauðvik vegna útþenslu alheimsins.

Eftir því sem fjarlægð þyrpingar er meiri sjást æ styttri bylgjulengdir rófs hennar á U -borðanum, sífellt nær útbláa toppnum sem er svo áberandi fyrir vetrarbrautir með virka stjörnumyndun.

Lokaorð

Þróun þyrpinga hefur margvísleg áhrif á litbrigði þeirra. Ungar þyrpingar og massalítlar hafa ekki náð að byggja upp jafn rauðleitt safn af sporvölupókum og þær eldri og massameiri. Jafnframt er aðsóp ungra þyrpinga væntanlega minna og innfallshraði vetrarbrauta minni, þannig að samruni vetrarbrauta verður algengari. Almennt verður því hlutfallslega meira af bláleitum vetrarbrautum í ungum þyrpingum.

Þegar fram líða stundir og þyrpingar stækka eiga þær sífellt auðveldara með að hrífa til sín vetrarbrautir af víðavangi en innfallstíminn verður að sama skapi styttri og stjörnumyndunarhrinan skammvinnari. Einnig má reikna með að árekstrar milli þyrpinga verði algengari með tímanum eftir því sem þyrpingar stækka og þeim fjölgar. Í slíkum atburðum losnar meiri heildarorka en dæmi eru um í nokkrum öðrum atburðum enda um gríðarlega stór kerfi að ræða. Þessir atburðir taka þó langan tíma, nokkur hundruð milljón ár eða svo.

Með hliðsjón af öllu þessu má gera ráð fyrir að það sé fyrst og fremst hlutfall blárra vetrarbrauta í þyrpingum sem sé gagnlegur mælikvarði á það sem kalla mætti aflfræðilegan aldur þyrpinga og þróunarástand þeirra. Hátt hlutfall bendir til þess að þyrping sé ung og enn að vaxa með aðsópi blárra gasríkra þyrilvetrarbrauta, eða þá að um samruna þyrpinga sé að ræða. Lág hlutfall, sem er einkennandi fyrir þyrpingar í næsta nágranni okkar, bendir á hinn bóginn til þess að þyrping sé aflfræðilega gömul og háþrúð og innihaldi fjölda rauðra vetrarbrauta í miðju. Vegna þess hve U -borðinn hentar vel til þess að greina stjörnumyndunarvirkni þá virðist $U - R$ litur vetrarbrauta og dreifing í $U - R$ línuriti ($U - R$ annað hvort sem fall af R eða rauðviki) vera gagnlegast til þess að ákvarða ástand vetrarbrauta og þróun þyrpinga. Fyrirhugað er að beita þessari aðferð á fleiri þyrpingar með frekari mælingum á næstu árum.

Summary: We use data obtained with the Nordic Optical Telescope to construct $U - R$ colour magnitude diagrams for galaxy clusters at different redshifts. We show that these diagrams provide useful constraints on theoretical models

for galaxy formation in cluster environments and hence on the overall cosmic evolution of galaxy clusters.

Heimildir

Butcher, H. og Oemler, A., 1978. The Evolution of Galaxies in Clusters I. *ApJ* 219,18.

Dye, S., Taylor, A.N., Greve, T.R., Rögnvaldsson, Ö.E., van Kampen, E., Jakobsson, P., Sigmundsson, V.S., Gudmundsson, E.H., Hjorth, J., 2002. Lens magnification by CL0024+1654 in the U and R band. *A&A* 386,12.

Kinney, A.L., Calzetti, D., Bohlin, R.C., McQuade, K., Storchi-Bergmann, T. og Schmitt, H.R., 1996. Template Ultraviolet to Near-Infrared Spectra of Star-Forming Galaxies and Their Application to K-Corrections. *ApJ* 467,38.

Sigmundsson, V., 2004. Clusters of Galaxies: $U - R$ color, infall dynamics and color-magnitude diagrams. Ritgerð til M.S. prófs við raunvísindadeild H.Í.

Rögnvaldsson, Ö.E., Greve, T.R., Hjorth, J., Gudmundsson, E.H., Sigmundsson, V.S., Jakobsson, P., Jaunsen, A.O., Christensen, L.L., van Kampen, E., Taylor, A.N., 2001. Depletion of background galaxies owing to the cluster lens CL0024+1654: U - and R -band observations. *MNRAS* 322,131.

van Kampen, E., Sigmundsson, V.S., Rögnvaldsson, Ö.E., Gudmundsson, E.H., Jakobsson, P., Greve, T.R., Hjorth, J., Jaunsen, A.O. og Dahle, H., 2005. The $U - R$ color-magnitude diagram as a probe for cluster galaxy evolution. Sent *MNRAS* til birtingar 2005.

Um höfundana:

Vilhelm S. Sigmundsson er kennari við Verzlunarskóla Íslands. Einar H. Guðmundsson er prófessor í eðlisfræði við Háskóla Íslands. Eelco van Kampen er sérfræðingur í stjarnfræði við Háskólann í Innsbruck í Austurríki.

¹Verzlunarskóli Íslands, Ofanleiti 1, IS-103 Reykjavík
vilhelm@verslo.is

²Raunvísindastofnun Háskólans, Dunhaga 3, IS-107
Reykjavík
einar@raunvis.hi.is

²Institut for Astrophysics, University of Innsbruck
Technikerstr. 25, A-6020 Innsbruck, Austria
Eelco.v.Kampen@uibk.ac.at