

Litabrigði vetrarbrautapyrpinga

Vilhelm S. Sigmundsson
Menntaskólanum í Reykjavík

Örnólfur E. Rögnvaldsson og Haakon Dahle

Nordita, Kaupmannahöfn

Páll Jakobsson og Jens Hjorth

Astronomisk Observatorium, Kaupmannahöfn

Einar H. Guðmundsson

Raunvísindastofnun Háskólans

Elco van Kampen og Thomas R. Greve

Institute of Astronomy, Edinburgh

Ágrip

Ævi vetrarbrauta snýst í meginatriðum um það að breyta gasþokkum í sól- stjörnur. Myndað þá stjörnur af öllum stærðum, allt frá mjög heitum og björtum bláum stórtísum að dautlum, köldum og raudlettum dvergum. Stærstu stjörnurnar hverfa fljótt af sjónarsviðinu, eftir um það bil 10 milljón ár, og þær finnast því alla jafna aðeins þar sem nýmyndun stjarna fer fram. Þegar frann lóða stundir breytist því litur vetrarbrauta. Þær verða raudlettar þegar stjörnu myndun fer þverrandi. Ytri aðstæður geta einnig haft áhrif, því vetrarbrautir sem falla inn í þyrpingar verða fyrir sjávarfallahrifum í þyngdarsviði þyrpingarinnar. Slíkar ytri truflanir sem og áreksstrar milli vetrarbrauta, geta hrundið af stað örrí nýmyndun stjarna þannig að megnið af gasinu gengur til þurrðar á skömmum tíma.

Í þeim rannsóknunum sem hér verður greint frá hefur Norræna stjörnufræðingarnir sýnt að gróðarstörum þyrpingum í nokkurra milljarða ljósára fjarlægð, þyrpingum sem eru að draga til sín vetrarbrautir. Aftargauri á lit vetrarbrautanna í þyrpingunum geta upplýsingar um áður nefndar stjörnu myndunarhrifin. Við höfum jafnframt borið dreflingu vetrarbrautanna í svonefndu litagrafi (e. colour magnitude diagram) saman við reiknilíkön og stefnt er að því að nota þá aðferð til þess að greina milli mismunandi heimslíkana.

1 Stjörnur, vetrarbrautir og þyrpingar

Myndun, líf og dauði sólstjarna er raubi þráðurinn í sögu alheimsins. Stjörnumur lýsa upp alheiminn, þær framleiða öll frumefni önnur en vetni og af þeim spretta því reiki- stjörnur og líf. Saga heimsins er á vissan hátt sífelld ummyndun vetnis og frumhelms í stjörnur. Þegar frann lóða stundir eykst hlutfall þyngri frumefna stöðugt vegna þess að stjörnumur sjálfar breytast í stjörnuleifar. Þunghafmengingar geimþokur og þetta hvíta dværga, nifteindastjörnur eða svarthol. Að sama skapi gengur upphaflega gasið smám saman til þurrðar.

Stjórnur myndast gjarnan í þyrpingum og hópast saman í gróðarmiklar vetrarbrautir. Í dæmigerðri stórrí vetrarbraut er að finna um 10^{11} stjörnur. Það eru einmitt vetrarbrautir sem skapa þau skilyrði sem viðhalda stjörnumyndun. Í þeim safnast gaspokur saman og myndu umhverfi þar sem einshéttleikinn er nokkrum stærðarþreppum meiri en meðalþéttleiki alheims. Þetta gerir nýjum stjörnum kleift að myndast, til dæmis vegna innþrýs áreksstra milli gaspoka eða annarra trúffana á jafnvæginu milli eigin þyrngdarafs og þrýstings sem gerir gaspokur jafn langlífir og rann ber vinni.

Vetrarbrautirnar eru þó meira en hrögöld af stjörnum og gasi. Þyrngdamættisþrúmmar þeirra mynda lokuð kerfi þannig að aturdr stjarnanna dreifast ekki út um geginum allan heldur lokast inni og sameinast gaspokunum sem fyrir eru og taka þannig þátt í hringrásinni á nýjan leik, verða hluti af næstru kynslóðum stjarna og reikistjarna. Einnig má á vissan hátt segja að vetrarbrautirnar eigi sín æviskeið. Þær myndast þegar smærri einingar renna saman, lífa sítt blómaskerð með því að fóstura stjörnur og renna svo ævina á enda þegar gas er uppuðið og nýmyndun stjarna lýkur.

Vetrarbrautir hafa tilhneigingu til þess að hópast saman eins og stjörnumnar. Dreifing þeirra er því ekki handahófskennd heldur safnast þær saman í gróðarstórar þyrpingar, jafnvel í þúsunda tali, og þyrpingar í einni stærri kerfi, reginþyrpingar, sem tengjast innþrýs þannig að áferð alheimsins líkist einna helst stápufröð með gapanði tóni á milli þyrpinganna þar sem vart er neitt að sjá. Þessi svonefnda stórgerð alheims er afsprengr þyrngdarafsis: Innþrýs tóg vetrarbrauta og hulduefnis skilur þær frá jafnri útbenslu rúmsins, þær falla ofan í sameiginlega mættisþrúmmu og myndu sífellt stærri kerfi sem síðan leitast við að sofa til sín flaut vetrarbrautum. Í dag eru hátt í tíu þúsund stórar þyrpingar þekktar í rími því sem kortlagt hefur verið með samhlégu öryggi, en það nær þó ekki nema þriðjung leiðarinnar út að endimökum hins sýnilega heims [3]. Dæmigerð stór þyrping telur nokkur þúsund stórar vetrarbrautir og ef til vill tífalt fleiri dvergvetrarbrautir, allt saman bundið í djúpan mættisþrúmm hulduefnis, því vetrarbrautirnar sjálfar eru vart nema lítið brot af heildarmassanum.

Skífvetrarbraut sem fellur inn í stóra þyrpingu verður fyrir ýmis konar hjúskí sem hefur mikil áhrif á þróun hennar. Gasforðinn er í eðli sínu viðkvæmur og lítið má út af þregða svo jafnvægi gaspokanna raskist. Sjávarfallkraftar þyrpingarinnar og áreksstrar við aðrar innfallandi vetrarbrautir geta valdið því að hrina stjörnumyndunar fer af stað og á skönnunum tíma breytist mikill hluti gasforðans í stjörnur, sumar einshíklar, þjartar og skammlífir en aðrar smærri og langlífari. Stjörnumyndunahrina (e. starburst) sem þessi kennur vel fram í rekinlíkönnu [5] og má sjá slík fyrirbæri í nálgænum vetrarbrautum þar sem áreksstrar eða aðrar utanaðkomandi aðstæður eru að verkki. Aðeðan á þessu stendur er vetrarbrautin að falla inn í þyrpinguna og finnur fyrir stéllu meiri þrýstingi frá lausu gasi sjálfar þyrpingarinnar, gasi sem á rætur að rekja til þeirra vetrarbrauta sem áður hafa sameinast þyrpingunni. Sá hluti gasforðans sem ekki verður stjörnumyndunahrinninn að bráð þrýstist út úr vetrarbrautinni og sameinast gasþjúp þyrpingarinnar (e. gas stripping). Þannig verður eftir hálfgeið þeinagrind þeirrar vetrarbrautar sem var. Aðeins stjörnumnar eru eftir, en þær hjórtustu deyja fljótt og eftir verður hrögöld lítilja rauðleitra stjarna. Vetrarbrautin er nú orðin rauðleit

sporvala. Þetta er eitt af einkennum stórra þyrpinga, í þeim finnst varla gasríkar skífur heldur eru sporvöllumnar mest áberandi og allsráðandi í miðju þyrpinganna.

Það er því þýna áhrifamikl og margþróið samspil sem á sér stað milli sólstjarna, vetrarbrauta og þyrpinga. Þrjú vetrarbrautanna er sameiginleg úrgeisun milljarða stjarna og áhrif þyrpingarinnar á stjörnumnar hefur áhrif á lit vetrarbrautanna. Það eru þessi lítabríði vetrarbrauta í þyrpingum sem eru til athugunar í þeim rannsóknunum sem hér er lýst.

2 Litabríði stjarna og vetrarbrauta

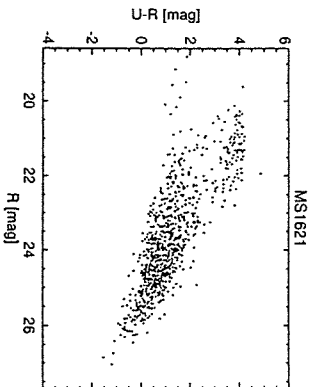
Sólstjörnur eru af ýmsum stærðum, allt frá lítlum dvergstjörnum upp í rísaóðir sem eru jafnvel 100 sinnum einismeyri en sólin. Lítur stjarna ræðst af fyrðorðshita þeirra (þær geisla líkt og svarthluti) og eru stærstu stjörnumnar heitar og þjartar og því oftast bláleitar, en minni stjörnur eru kaldari, rauðleitari og dauðari. Nú er það svo að því stærri sem stjörnur eru, þeim mun stýrti verður ævi þeirra. Bláleitar stjörnur eru því skammlífir og komast aldrei langt frá fæðingarsað á sinni struttu ævi, en langlífari og rauðleitari stjörnur dreifast víðar. Af þessum sökum er auðvelt að þekja þau svæði þar sem stjörnumyndun fer fram: Þar eru heitu bláleitu stjörnumnar ráðandi.

Ljósið frá stjörnumum og dörrum fyrirþerum alheimsins dreifist á allt rafsegulhrófi og stjarnfræðingar þúta það niður í bil eða borða til nánari skoðunar. Á sýnilega sviðum eru notðar tilteknar ljóssir, t.d. Cousins stúrnar (U, B, V, R og I) eða Gunn-stúrnar (u, g, r, i), eða einhverjar aðrar vel skilgreindar stúrnar. Ljósennarir sjálfir eru nánast einöngu CCD-flögur, í kjölfar þeirrar byltingar sem átti sér stað upp úr 1980 þegar rafæmni ljósenemar komu í stað gömlu ljósmýndaplatanna.

CCD-flögurnar eru límbindar. Þær telja þara þær ljósendir sem komast gegnum þá síu sem sett er í ljósganginn hverju sinni. Þó er næmi CCD-nema háð bylgjulengd þess ljóss sem á þá fellur, nær næstum 100% um miðbik sýnilega sviðsins en fellur hratt í átt að útbláu. Þetta stafar af því að ljósendinnar þurfa að fara gegnum CCD-flöguna sjálfa og stýrti bylgjulengdir deýfast mjög við það. CCD-flögurnar eru málþafar að eiginleikum hvað þetta varðar og eru sumar þeirra framleiddar gegngert til að auka næmni á stýrti bylgjulengdum með því að þýna þær sem mest. ALFOSC-myndavél Norræna sjónaukans er einmitt með þýntri LORAL-flögu sem er sétlegra næm á U-borða.¹

Norræni stjörnufróðinn er með aðalspegl sem er 2.56 m í þvermál, og er því allta stór og Hubblessjónaukin. Hann telst þó ekki ykja stór sé hann borinn saman við rísafróðannu sem tekur háfa verið í notkun á síðustu árunum, en þeir eru margir 6 til 8 metrar að þvermáli. Einn sem komið er stendur hann þó vel fyrir sínu og þegar kemur að mælingum á U-borðannu stendur hann stærri sjónaukinum fyllilega á sporði. Það stafar af mikilli næmni CCD-nemans á U-borða. Reyndar er það svo, að fáir stjarnfræðingar geta mælingar í útbláu vegna þeirra tæknilegu örðugleika sem því eru samfara, nema með Hubblessjónaukanum.

¹Frám að þessu er ALFOSC ein myndavél Norræna sjónaukans, sem Íslendingar hafa notað. Námari upplýsingar um tækni má finna á heimasíðu sjónaukans: www.doc.iac.es.



Mynd 1: Litabrigði allra vetrarbrautanna á svæði þyrpingarinnar MS1621.5-2640. Skipting í rauðar (U-R ~ 4) og bláar (U-R ~ 1) vetrarbrautir kemur greinilega fram. Þessi tvískipting er einnig áberandi þótt aðeins séu valdar þær vetrarbrautir sem sannanlega eru í þyrpingunni (en ekki í forgrunni eða bakgrunni).

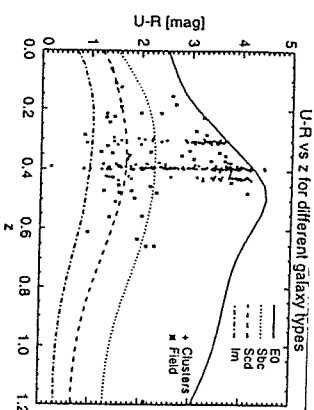
3 Mælingar og gögn

Afhuganir okkar á litabrigðum vetrarbrautabýrpinga má rekja til mæligæna sem afhjóð var í öðru verkefni, mælingum á þyrngdarhinsubrifnum vetrarbrautabýrpinga [6]. Í tengslum við svonefnda Hugvísikeppni framhaldsskólannemenda, sem er hluti af Eyr-ópukeppni ungra vísindamanna, kom upp sú hugmynd að skoda gögnin sem afhjóð var með Norræna sjónaukanum út frá öðrum forsendum. Set var samantekni með fjór- um nemendum Menntaskólans í Reykjavík þar sem notuð voru mæligögn fyrir þyrpinguna MS1621.5-2640, sem hefur raðvikið $z = 0.43$. Litabrigði þyrpingarinnar eru sýnd á mynd 1. (Sjá *Morgunblaðið* 29. apríl 1999, bls. 54 og 28. september 1999, bls. 10).

Ljósmynd af þyrpingunni, sem tekin var með Norræna sjónaukanum, var borin saman við öðru birt gögn um raðvikið hátt í 100 vetrarbrauta í þyrpingunni [1]. Þannig voru fundnar þær vetrarbrautir sem voru hvoru tveggja með staðfest raðviki og mælingar á U og R borðum. Eins og sjá má af mynd 2 skera þyrpingar sig greinilega úr þegar litvörnin (U-R) er teiknaður sem fall af raðviki z . Raðvöðust vetrarbrautinnar (hátt gildi á U-R) eru í þyrpingunni, en vetrarbrautir í forgrunni og bakgrunni eru blárrí. Á mynd 1 sést hins vegar hin athyglisverða tvískipting vetrarbrautanna í þyrpingunni í raðvöðuleitan hóp (U-R ~ 4) og bláleitan hóp (U-R ~ 1) og er geil á milli þeirra.

Eftir á að lýggja þarf kannski ekki að komna á óvart að þessi geil skuli komna fram. Í samræmi við það sem öðru segir um þróun þyrpinga er þar annaðhvort að finna rauðar sporvöður í mjögu þyrpingarinnar eða innfallandi skífuvetrarbrautir sem líkast til eru að myndu stjörnur í gró og eng og eru því bláleifar. Það er þó ónæmlega skemmtlegt að sjá slíkt samræmi milli fræðilegra hugmynda um þróun þyrpinga annars vegar og mælinga hins vegar. Rétt er að benda á að mælingar á U-borðum eru einkar vel til þess falnar að sýna þetta óvitrætt þar sem U-borðin er mjög næmur mælikvæði á stjörnuþróun.

Litabrigði vetrarbrautabýrpinga



Mynd 2: Samanburður á reikniflökunum og mæligögnum fyrir þróun mismunandi vetrarbrautanna. Um er ræða mæligögnum fyrir þyrpingarinnar CL0024+1654 ($z = 0.39$), MS1008-1224 ($z = 0.30$) og MS1621.5+2640 ($z = 0.43$). Efta línan sýnir þróun litvísis fyrir sporvöður en hinar tvær neðstu fyrir skífur.

Nú vaknaði óljákvæmlega sú spurning hvort tilvist þessarar geilar, ásamt með breidd hennar og staðsetningu í U-R línunni, gefi meiri upplýsingar, til dæmis hvort hær sjáist einhver tengsl við innfallstíma aðvifandi vetrarbrauta. Lauslegur samanburður við fræðileg líkön af þróun vetrarbrauta og þyrpinga virtist fljótt á litð benda til þess að geil kæmi fram þegar stúðst var við þau heimslíkon sem flæsir stjarnfræðingar aðhyllast í dag, en að breidd geilarinnar og staðsetning væri að einhverju leyti háð ýmsum heimsfræðilegum kenningarum eins og þétteleikskilkanum Ω og heimsfastanum Λ . Vár því hafst handa við nánari fræðilega útlæsun auk þess sem sótt var um frekari tíma á Norræna sjónaukanum til þess að athuga hvort sviðuð geil kæmi fram hjá öðrum þyrpingum. Háta nú fengist gögn fyrir þróun þyrpingar með mismunandi raðviki. Geilin í U-R kemur misvel fram, enda er við því að háast að einhverjar vetrarbrautir lendi í mjögu geilinni, nefnilega þær sem eru að þróast úr því að vera bláleifar skífur yfir í sporvöður djúpt í mættisþrunni þyrpingarinnar.

4 Reikniflök og samanburður við mælingar

Á stóustu árum háfa orðið miklar framfarir í reikningum á þróun vetrarbrauta. Í víðamiklum reikniflökum er fylgst með þróun bæði gasdreifingar og stjarna í vetrarbrautum, sem geta verið annaðhvort stakar eða í áreksrum. Þessi reikniflök, svonefnd stjörnuþróunarlíkon [2] (e. stellar population synthesis models) gefa mynd af fjölda og dreifingu þeirra stjarna sem myndast og þar með má rekna út heildarbirtnu vetrarbrautar á gefinni byrgjulengd. Kosturinn við þessi líkon er sá að auðvelt er að bera þau saman við mælingar. Hægt er að láta líkanvetrarbraut sem þessa þróast í tíma og fylgja með hvernig ljósið frá henni breytist, en bæta síðan við upplýsingum um fjarlægð hennar og hvernig birtdreifing hennar lítur út séð frá okkur að reiknu tilhliti til raðvöðs. Baksvið þessara líkana er heimur í útþenslu og ákveðnar forsendur um

efnisþéttleika alheimsins, úþpensluhraða o.þ. eru nauðsynlegar.

Við höfum þróað fjölda líkana út frá mismunandi forsendum og með ýmsum gildum á innri stikunum, til dæmis massadreifingu nýmyndaðra stjarna (oftar reiknað með Saþberer dreifingu), áhrifum vegna mismunandi umhverfis vetrarbrauta í þyrpingum og fleiri þátta [4, 5]. Í mörgum þessara líkana kemur fram fyrirnefnd gæli í U-R. Innurtí, en staðseining hennar og breidd er háð ýmsum forsendum reiknilíkananna. Nýrind 2 sýnir niðurstöður okkar fyrir þróun vetrarbrauta í þyrpingu. Þar sem kemur fram greinileg tvískipring í skífvetrarbrautir (S) og sporvöður (E). Eins og sjá má er munurinn milli þessara tveggja hópa (breidd gæliarinnar í U-R ritinu) mismunandi eftir raubviki og nær hámarki við $z \sim 0.4$. Á nýrind 2 eru eining til samanburðar mælingar okkar á U-R lítvísi fyrir þrjár þyrpingar. Samræmi milli mælinga og reiknilíkans er nokkuð gott. Svo vírðist sem besta samræmið fást ef stjörnumyndun fer bæði fram í hinnum og jafnt og þétt. Mælingar okkar á litabrigðum fjarlæggra þyrpinga vírðast því vel til þess falhar að velja raunhæf líkon. Jafnvel er hugsanlegt að frekari mælingar og þetri tölfræði geti áhmarkað ýmsa innri og ytri stika í þróun vetrarbrauta í þyrpingum.

Sem fyrir segir endurspeglar heildarþrjá vetrarbrauta í þyrpingu stjörnumyndarsögu hverrar vetrarbrautar um sig, sem er háð bæði innri þáttum hverrar vetrarbrautar og umhverfi hennar í þyrpingunni. Forvinnlegt er að þetta saman þyrpingar með tilfiri til þessara áttrá. Hvort einhver munur finnst á litabrigðum þyrpinga við sama raubviki, sem gæti verið afleiðing af mismunandi ævi þeirra og þróun. Þannig mætti fá vísbendingar um þróun þyrpinga við raubviki ~ 0.4 með mælingum á U-R lítvísi. Ennfremur er hugsanlegt að nota fyrirhugað gógu til þess að kanna tvívíða dreifingu vetrarbrautanna í þessum þyrpingum á hvelfnunni og aþinga hvort bláur og rauðar vetrarbrautir innan þyrpinganna dreifast á mismunandi vegu. Út frá fræðilegum forsendum er búist við að bláur vetrarbrautir séu frekar í útþaðri þyrpinganna en þær raubú nær miðju.

Heimildir

- [1] Ellingson et al., 1997. *ApJ. Suppl.* 113, 1.
- [2] Jimenez, R., Padovan, P., Maltucci, F. & Heavens, A., 1998. *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* 299, 123.
- [3] NASA Extragalactic Database (NED): nedwww.ipac.caltech.edu.
- [4] van Kampen, E., Jimenez, R. & Peacock, J.A., 1999. *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* bf 310, 43.
- [5] van Kampen, E., Sigmundsson, V.S., Rögnvaldsson, Ó.E., Guðmundsson, E.H., Jakobs-son, P., Greve, T.R., Hjorth, & Dahle, H., 2002. "The U-R color magnitude diagram as a probe for cluster galaxy evolution". Í vinnslu.
- [6] (a) Örnólfur E. Rögnvaldsson, Einar H. Guðmundsson, Pall Jakobsson, Vilhelm S. Sig- mundsson, J. Hjorth, T.R. Greve, L.L. Christensen, A.O. Jaussen, E. van Kampen, & A.N. Taylor "Þyngdarlínsurnar CL0024 og MS1621.5". Í *Eðlisfræði á Íslandi IX*. Ritsstj. Ari Ólafsson. RvÍk 1999, bls. 179-193.
(b) Rögnvaldsson, Ó.E., Greve, T.R., Hjorth, J., Guðmundsson, E.H., Sigmundsson, V.S.,

Jakobsson, P., Jaussen, A.O., Christensen, L.L., van Kampen, E. & Taylor, A.N., 2001. *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* 298, 1133.
(c) Dye, S., Taylor, A.N., Rögnvaldsson, Ó.E., van Kampen, E., Jakobsson, P., Sigmundsson, V.S., Guðmundsson, E.H. & Hjorth, J., 2002. *Astronomy and Astrophysics* 386, 12, (astro-ph/0108399).

Summary

The observed spectrum of a distant unresolved galaxy is the integrated and redshifted sum of its individual stellar spectra. The various factors affecting the stellar content and evolutionary state will therefore show up in the observed spectrum. This includes large-scale features resulting from starbursts, mergers, overall stellar age and the star to gas ratio. The U-R color is a good measure of galaxy type, since early-type (elliptical/S0) galaxies will be reddish (with U-R ~ 4) whereas late-type (spirals) will be bluish (with U-R ~ 1 to 2). The U and R bands are separated in wavelength by a factor of two so that a redshift of less than 1 will not manage to shift the rest-frame U into the observed R band. A gap, discovered in the U-R color-magnitude diagram (CMD) for the $z \sim 0.43$ cluster MS 1621.5+2640 led to our measurements for 4 other distant clusters and a similar effect has been observed: the U-R CMD is depleted between U-R ~ 2 and U-R ~ 3 . Numerical studies using population synthesis models for clusters of galaxies indicate that this gap should indeed appear, given certain parameters for cluster evolution, and the position and width of the gap should depend on redshift as indicated in our fig. 2. We find that data obtained thus far is in reasonably good agreement with our numerical models.

ISSN 1670-0570

EDLISFRÆÐI Á ÍSLANDI X

Ráðstefna Eðlisfræðifélags Íslands
í Hátiðasal Háskóla Íslands
17. – 18. nóvember 2001

Eðlisfræðifélag Íslands
júní 2002

Eðlisfræði á Íslandi X
séðhefi af 16. árgangi Fréttabréfis Eðlisfræðifélags Íslands
ISSN 1670-0570

© júní 2002: Eðlisfræðifélag Íslands
Rannvísindastofnun Háskólans
Dunhaga 3, 107 Reykjavík

Ráðstefnustjórn:
Viðar Guðmundsson, ráðstefnustjóri
Gunnlaugur Björnsson, dagskrárstjóri
Jón Tómas Guðmundsson, gjaldkeri

Styrktaraðilar:
Almanakssjóður HÍ
Rannvísindastofnun HÍ, Eðlisfræðistofa

Ritstjóri:
Ari Ólafsson
Tölvuvinnsla og umbrot:
Ari Ólafsson
Ljósmyndir:
Sveinn Ólafsson, Unnar B. Arnalds og Viðar Guðmundsson
Prentun:
Fjölritunarstofa Danfæls Halldórssonar
Upplag:
300 eintök