

Figura 145: Relação entre o tipo morfológico e a densidade local para galáxias em aglomerados. O histograma no alto de cada painel mostra o número de galáxias para cada intervalo de densidade superficial. Para os aglomerados do HST ( $0.36 < z < 0.57$ ), o histograma hachurado do alto dá a distribuição de galáxias após correção da contaminação de galáxias na linha de visada. Os dois gráficos à direita são de [Smith et al. \(2005\)](#) com dados adicionais até  $z \approx 1$ .

[Dressler et al. \(1997\)](#) estudaram 10 aglomerados a *redshifts* intermediários,  $z \sim 0,5$ , e encontraram diferenças significativas em relação a aglomerados próximos. A fração de lenticulares é muito menor em redshift intermediário e as espirais não apresentam o mesmo gradiente acentuado, observado em  $z \sim 0$ .

A segregação morfológica é detectada até  $z \approx 1$  ([Smith et al., 2005](#)), mas é menos intensa que no Universo local ( $z \approx 0$ ). A semelhança entre a segregação morfológica em  $z \approx 1$  e  $z \approx 0,5$  sugere que a evolução morfológica se dê principalmente após  $z \approx 0,5$ , i.e., nos últimos  $5 \times 10^9 h_{70}^{-1}$  de anos. Em ambientes pouco densos, a fração de galáxias precoces (*early-type*, E+S0) é quase constante,  $f_{E+S0} = 0,4 \pm 0,1$  desde  $z \approx 1$  até hoje.

A origem da segregação morfológica pode estar ligada ao chamado efeito Butcher–Oemler.

#### 5.11.4 Sequência vermelha e efeito Butcher–Oemler

Uma característica importante das galáxias elípticas é a existência de uma **relação cor–magnitude**, a “**sequência vermelha das elípticas**”: as galáxias mais brilhantes são também as mais avermelhadas. A relação entre cor e luminosidade aparece no trabalho de [Baum \(1959\)](#) e foi efetivamente descoberta por [Faber \(1973\)](#); [Visvanathan & Sandage \(1977\)](#). A figura 146 mostra este efeito para três aglomerados.

Esta “sequência vermelha” é bem determinada sendo utilizada para se identificar aglomerados em *redshifts* mais elevados ([Gladders & Yee, 2000](#)) – observa-se a cor de um conjunto de galáxias em uma dada região, se aparece a sequência vermelha no diagrama cor–magnitude então, provavelmente, há um aglomerado nesta região (lembrando que a maioria das galáxias em um aglomerado são elípticas).

Esta relação cor–magnitude pode ser explicada de duas maneiras: como um efeito de idade, implicando que as galáxias mais antigas (mais vermelhas) seriam mais luminosas, ou como um efeito de metalicidade, as galáxias mais brilhantes seriam mais ricas em metais.

Vários trabalhos sugerem que a segunda hipótese é mais provável, isto é, exista uma relação luminosidade–metalicidade ([Ellis et al., 1997](#); [Ferrerias, Charlot & Silk, 1999](#); [Terlevich et al., 1999](#), veja também a Fig. 255). Basicamente, galáxias mais maciças são capazes de reter de maneira mais eficaz os metais produzidos e ejetados por estrelas maciças: os ventos galácticos produzidos por supernovas não são fortes o suficiente para ejetar os metais das galáxias mais massivas.

Contudo, alguns modelos semi-analíticos de formação e evolução apontam para uma explicação mista, a relação cor–magnitude seria devida a um efeito de idade e metalicidade: as galáxias mais maciças seriam mais antigas e mais ricas em metais.

O efeito mais visível é uma translação da Seq. Vermelha quando vamos de alto redshift para  $z = 0$ , que corresponde ao envelhecimento passivo das estrelas (Fig. 147).

Observações de aglomerados em alto redshift mostram que a inclinação da Sequência Vermelha se altera

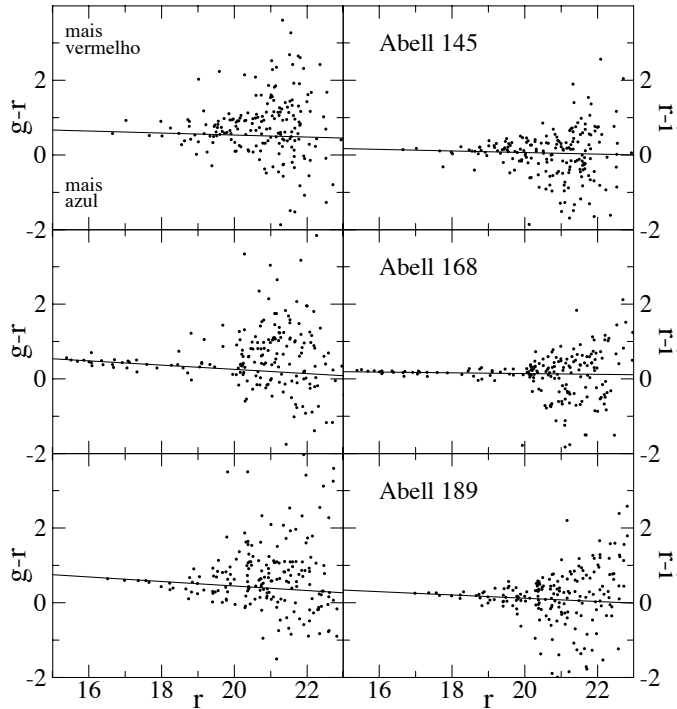


Figura 146: Relação cor–magnitude em três aglomerados. Os filtros  $g$ ,  $r$  e  $i$  estão centrados em 5118 Å, 6798 Å e 8100 Å, respectivamente. As retas representam ajustes que correspondem à posição das galáxias elípticas (a chamada **sequência vermelha** das elípticas). Figura tirada de (Margoniner & de Carvalho, 2000).

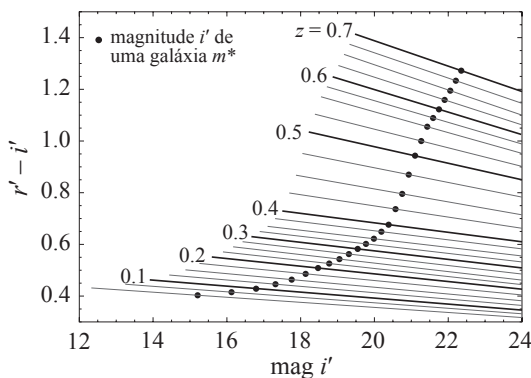


Figura 147: Evolução passiva da Sequência Vermelha, entre *redshift*  $z = 0.33$  até  $0.7$ , segundo o modelo de Kodama & Arimoto (1997). O ponto (●) em cada linha corresponde à magnitude da banda  $i'$  de uma galáxia de magnitude absoluta  $M_{i'}^* = -21,52 + 5 \log h_{70}$ . Figura tirada de Barkhouse et al. (2006).

muito pouco com o tempo desde  $z \sim 1$  (*lookback time*  $\sim 7,5$  bilhões de anos) – em  $z \approx 0,5$  a inclinação da Sequência Vermelha é essencialmente a mesma que a inclinação em  $z = 0$ . A variação da inclinação pode dar vínculo à época de formação das galáxias elípticas (vermelhas), com uma pequena dependência do modelo cosmológico adotado (veja Fig. 148).

Em 1978, Butcher & Oemler observaram dois aglomerados distantes (3C 295 a  $z = 0.46$  e 0024+1654 a  $z = 0.39$ ) e encontraram um excesso de galáxias azuis em relação à população típica de aglomerados próximos. Em 1984, estes mesmos autores estudam mais 33 aglomerados entre  $0.003 < z < 0.54$  e confirmam o excesso de galáxias azuis (este excesso é medido em relação à sequência vermelha das elípticas) Este efeito ficou conhecido como *efeito Butcher–Oemler*.

A figura 149 ilustra o efeito Butcher–Oemler assim como um trabalho mais recente de Margoniner & de Carvalho (2000) com uma nova determinação deste efeito, baseado em fotometria CCD de 44 aglomerados do catálogo de Abell.

É importante levarmos em conta onde no aglomerado a fração de galáxias azuis é medida. A figura 150 mostra esta dependência para 5 aglomerados. Notamos que a fração de galáxias azuis aumenta com a distância ao centro do aglomerado.

O efeito B-O mostra que há uma evolução das galáxias em aglomerados em um passado relativamente próximo, ao contrário do que se constata dos próprios aglomerados, que apresentam pouca evolução em suas propriedades (por exemplo, temperatura e metalicidade do gás intra-aglomerado).