

Introdução

1 Os cenários principais

Em grandes escalas (acima de alguns kpc) o universo visível é povoado por galáxias. Quando elas se formaram? Como elas se formaram? Como elas evoluem?

Dois cenários básicos procuram responder a essas perguntas: o do colapso monolítico e o hierárquico. Antes de ver o que eles propõem, consideremos as principais estruturas visíveis nas galáxias.

2 Componentes estruturais visíveis

Galáxias são constituídas de matéria bariônica e de matéria escura não-bariônica.

Considerando apenas a matéria luminosa, podemos identificar duas componentes estruturais básicas nas galáxias:

- a componente esferoidal
Encontrada nas galáxias elípticas e nos bojos e halos de espirais. Tem forma esferoidal, normalmente pouca rotação e as estrelas apresentam órbitas muito excêntricas. São sistemas dinamicamente *quentes* (com dispersão de velocidades alta).
- a componente disco
Discos são estruturas achatadas em rotação onde as estrelas têm órbitas quase circulares. São sistemas dinamicamente *frios*.

A *Sequência de Hubble* é aproximadamente um contínuo da razão entre essas duas componentes.

3 O cenário do colapso monolítico

Em um trabalho clássico, o estudo da cinemática de estrelas da vizinhança solar levou Eggen, Lynden-Bell e Sandage (1962; ELS) a propor um modelo para a formação de nossa galáxia.

Neste estudo os autores verificaram que as estrelas velhas do halo da Via Láctea tendem a ter órbitas muito elípticas, características de formação em um colapso em queda livre, enquanto as estrelas mais jovens tendem a ter órbitas mais circulares, típicas do disco (ver figura 1).

Esta observação levou os autores a propor um cenário para a formação da galáxia que é hoje denominado *cenário monolítico* (ou clássico). Nesse cenário, a proto-galáxia que viria a formar a Via Láctea colapsou rapidamente, há uns $\sim 10^{10}$ anos atrás, numa escala de tempo de $\sim 10^8$ anos, formando estrelas com órbitas muito excêntricas, que viriam a formar o halo e o bojo da Via-Láctea. As nuvens de gás remanescente teriam colidido entre si e, por conservação do momento angular, se estabelecido num disco gasoso e a formação estelar que teria ocorrido nele mais tarde formaria a população disco.

Como grande parte das estrelas nas elípticas ou nos bojos das espirais são velhas, este cenário tornou-se o modelo clássico para explicar a formação das populações estelares mais velhas encontradas na componente esferoidal das galáxias. No caso das elípticas, supõe-se que o grosso do gás é convertido em estrelas durante o colapso, antes de o gás ter tempo de se acumular em um disco, de modo que as estrelas nesse tipo de galáxia teriam todas mais ou menos a mesma idade. O mesmo se aplicaria aos bojos.

A figura 2 ilustra a formação de galáxias no cenário monolítico.

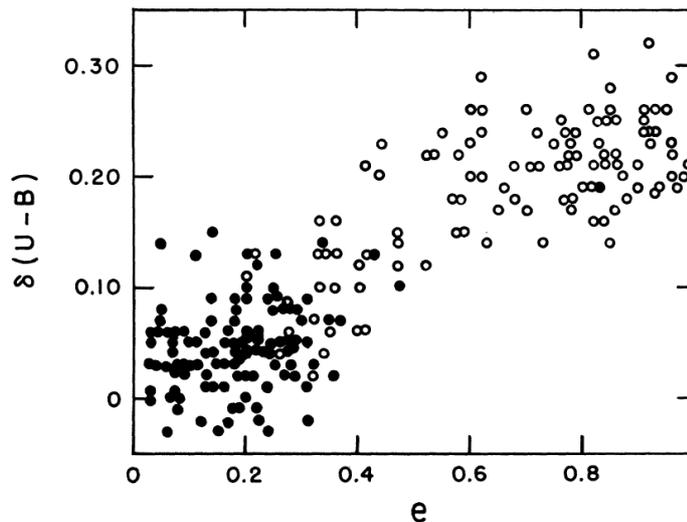


Figure 1: Correlação entre o excesso de ultravioleta, $\delta(U - B)$, interpretado como proporcional à idade, e a excentricidade orbital para uma amostra de estrelas anãs da Via Láctea (ELS).

4 O cenário hierárquico

O cenário monolítico começou a ser desafiado a partir dos anos 80 do século passado, com o surgimento do modelo de formação de estruturas baseado em matéria escura fria (*cold dark matter*, CDM) e, a partir dos anos 90, com a intensificação da observação de galáxias em altos redshifts.

No cenário hierárquico as primeiras estruturas a se formar são “halos” de baixa massa, constituídos de matéria escura e bárions. As galáxias crescem então por fusões (*mergers*) com outras galáxias, em escalas de tempo longas, da ordem da idade do universo. Como a maior parte da massa é matéria escura (que não absorve nem emite radiação) fria (partículas não-relativísticas), é a matéria escura (ME) que rege a formação das galáxias. Neste cenário os bárions são apenas coadjuvantes.

Imagina-se que, em grandes escalas, a distribuição de ME e bariônica seja uniforme. Mas em pequenas escalas, não. Inicialmente as condensações de ME colapsam (formando halos), as escalas menores primeiro, as maiores mais tarde. A matéria bariônica colapsa nesse halos se aquecendo e, mais tarde, parte dela volta a se resfriar, se acomodando na forma de um disco (por conservação do momento angular), onde eventualmente estrelas se formam.

Fusões de galáxias são essenciais no modelo hierárquico. Este tipo de fenômeno, embora mais comum no passado, ocorre bastante ainda hoje. A galáxia Antennae (figura 4) é um exemplo bem conhecido. O efeito de uma fusão sobre uma galáxia depende de vários parâmetros, como as massas das galáxias envolvidas, a quantidade de gás e momento angular em cada uma, o parâmetro de impacto da colisão, etc. Em geral consideram-se dois tipos de fusões: “fusões pequenas” (*minor mergers*) e “fusões grandes” (*major mergers*). Se uma galáxia pequena se funde com uma massiva, o efeito da primeira sobre a segunda é pequeno. Um exemplo é a galáxia de Sagitário, que está se fundindo com a Via Láctea. Quando esta fusão terminar, as estrelas de Sagitário terão sido incorporadas à nossa galáxia e guardarão suas propriedades cinemáticas, mas esta fusão não alterará significativamente a estrutura em grande escala da Via Láctea.

Se, contudo, a fusão envolver galáxias de massas semelhantes, o disco será destruído e suas

Modelo Clássico

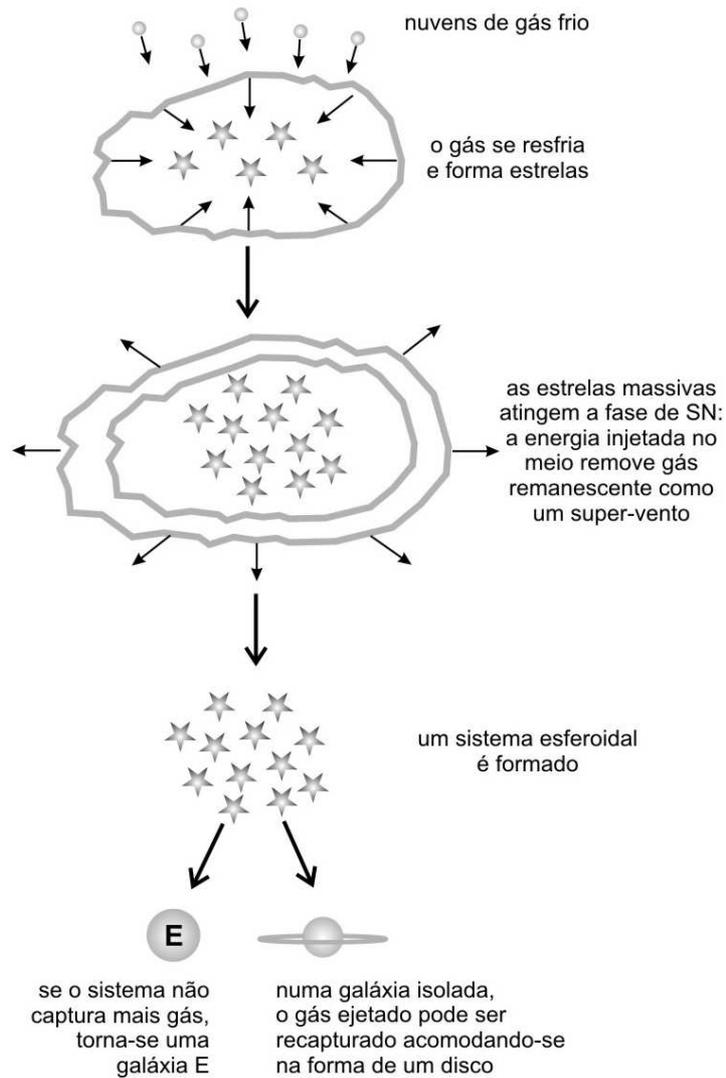


Figure 2: Esquema do cenário clássico (ou monolítico) de formação de galáxias.

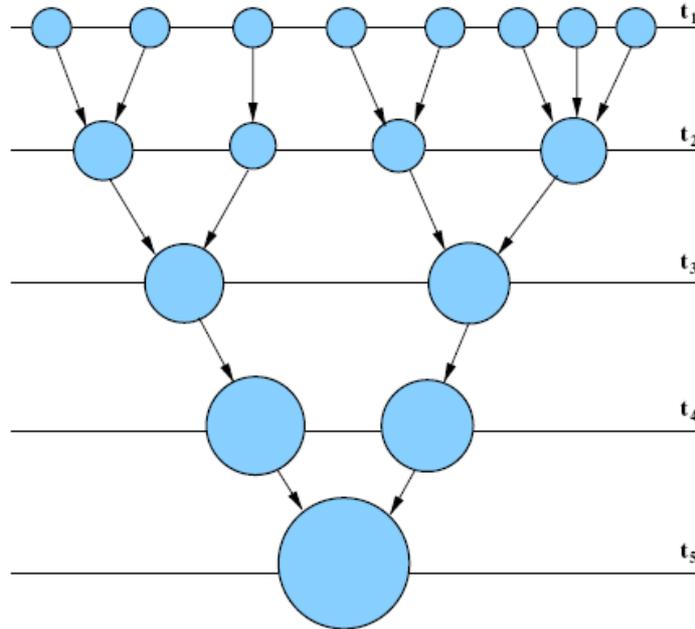


Figure 3: Ilustração de uma árvore de fusões. Conforme o tempo passa (de cima para baixo) os halos vão se fundindo formando a galáxia.

estrelas serão “aquecidas”, adquirindo maior dispersão de velocidades e formando uma componente esferoidal. Nuvens de gás poderão colidir produzindo grandes surtos de formação estelar (*starbursts*), como observado na Antennae. Se o gás remanescente for ejetado pela violência da interação, o resultado da evolução deste sistema será uma galáxia dominada pela componente esferoidal. Se, contudo, quantidades apreciáveis de gás subsistirem à fusão, o gás pode se acomodar em um novo disco. Assim, neste cenário, o tipo morfológico de uma galáxia pode mudar.

Nesse ponto convém discutir dois tipos de fusões: molhadas e secas (*wet and dry mergers*). Fusões molhadas ocorrem entre sistemas contendo gás e, portanto, podem produzir surtos de formação estelar, enquanto que as fusões secas se dão entre sistemas desprovidos de gás e não produzem formação estelar. Este último tipo de fusão pode ser importante para as elípticas.

Uma forma interessante de descrever a evolução de galáxias no modelo hierárquico é com as “árvores de fusão” (*merger trees*), como a ilustrada na figura 3. Um halo massivo hoje é formado por várias fusões com galáxias de massa menor.

Como veremos, há ainda muitos problemas com o cenário hierárquico. Contudo, ele é o paradigma aceito hoje para explicar como as galáxias se formam e evoluem.

5 A evolução das galáxias

Outros processos, além das fusões, jogam um papel importante na evolução das galáxias. Um deles é o ambiente.

Aglomerados de galáxias, por exemplo, além de possuírem um grande número de galáxias relativamente próximas entre si e movendo-se em altas velocidades ($\sim 700\text{--}1000\text{ km/s}$), possuem

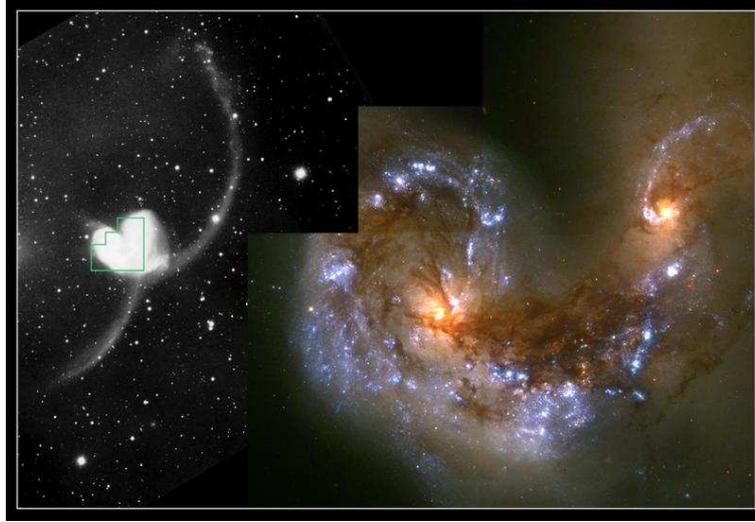


Figure 4: Fusão de galáxias. A Antennae é um par de galáxias em colisão. A imagem da direita (do HST) mostra a região central do sistema, onde há um starburst vigoroso.

um meio intergaláctico com gás muito quente (milhões de K). Na verdade, a maior parte da matéria bariônica em aglomerados está na forma de gás quente, não em galáxias. Uma galáxia espiral que cai no aglomerado pode perder seu gás pela pressão de arraste do gás quente e pelas forças de maré das galáxias que passam mais perto. Parte das estrelas dessa galáxia também podem ser removidas pelas marés, vindo a formar um halo difuso em torno do centro do aglomerado. Ao mesmo tempo, pela ação da fricção dinâmica, a galáxia tende a migrar para as regiões centrais do aglomerado. No final desse processo, aquela galáxia originalmente espiral já seria observada como S0 ou elíptica.

Em grupos de galáxias a dispersão de velocidades é bem menor, poucas centenas de km/s e, nessas condições, fusões de galáxias podem ocorrer.

A evolução dos bárions dentro dos halos de matéria escura é complicada. Imagina-se que, inicialmente, eles estão na forma de um gás quente. O gás pode se resfriar, com o gás frio se acumulando em um disco e, se for suficientemente denso, transformando-se parcialmente em estrelas. As estrelas mais massivas explodem como supernovas e, devido à energia que transferem para o meio interestelar, podem aquecer o gás frio (nuvens de HI ou HII) e interromper a formação estelar. Além disso, a galáxia pode estar engolindo satélites (pequenos halos) e sofrendo outros efeitos do ambiente. No caso de galáxias de baixa massa, este *feedback* das supernovas pode ser suficientemente forte para expulsar todo o gás da galáxia e apagar para sempre a formação estelar.

Devido à complexidade dos processos envolvidos, procedimentos puramente analíticos não são possíveis e, assim, é necessário se recorrer, como veremos, a simulações numéricas e/ou modelos semi-analíticos.

6 Referências

1. Eggen O. J., Lynden-Bell D., Sandage A. R., 1962, ApJ, 136, 748