

Galáxias anãs de brilho ultrabaixo

Rainer Karl Madejsky

Universidade Estadual de Feira de Santana

Resumo

A primeira galáxia anã de brilho ultrabaixo UFD (*ultra-faint dwarf*) foi descoberta no levantamento SDSS (Sloan Digital Sky Survey) em 2005, iniciando uma busca que resultou na descoberta de dezenas de galáxias anãs similares. Trata-se de uma continuação das galáxias anãs clássicas conhecidas antes do levantamento SDSS em direção a luminosidades e metalicidades mais baixas. O estudo da cinemática estelar mostra que as galáxias UFD possuem mais matéria escura que as galáxias anãs clássicas. As observações espectroscópicas revelam que as estrelas nas galáxias UFD são entre as mais velhas conhecidas e as de mais baixa metalicidade. As abundâncias de ferro Fe e de outros elementos químicos mostram grandes variações em consequência de formação estelar extensa no passado. A análise de estrelas individuais nas galáxias UFD em um intervalo estreito de massa estelar é consistente com a hipótese de que se formaram muitas estrelas de alta massa nas galáxias UFD e que o processo de formação estelar terminou na época de reionização do universo no *redshift* $z \sim 6$. Uma vez que as galáxias anãs de brilho ultrabaixo UFD são os sistemas estelares mais velhos e os mais escuros conhecidos no universo, as mesmas são excelentes laboratórios para estudar a formação das primeiras galáxias no universo bem como o comportamento de matéria escura em pequena escala.

Abstract

The first ultra-faint dwarf galaxy UFD was discovered in the Sloan Digital Sky Survey SDSS in 2005, beginning a search that led to the discovery of several tens of similar dwarf galaxies. They are a continuation of the classical dwarf spheroidal galaxies known before SDSS towards lower luminosities and lower metallicities. The study of stellar kinematics revealed that UFD galaxies have more dark matter than the classical dwarf galaxies. Spectroscopic observations show that the stars within UFD galaxies are among the oldest and most metal-poor stars known. The abundances of iron Fe and other chemical elements show large spread due to extended star formation in the past. The analysis of individual stars in UFD galaxies in a small stellar mass interval is consistent with the hypothesis that large numbers of massive stars were formed in UFD galaxies and that the process of star formation ended at the epoch of reionization of the universe at redshift $z \sim 6$. Once the UFD galaxies are the oldest and most dark matter-dominated known stellar systems, they are excellent laboratories to study formation of the first galaxies in the universe as well as the behaviour of dark matter on small scales.

Palavras-chave: galáxias anãs, cinemática, matéria escura, metalicidade, formação de estrelas.

Keywords: dwarf galaxies, kinematics, dark matter, metallicity, star formation.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43864](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43864)

1 A descoberta das galáxias

A existência de galáxias além dos limites da Via Láctea foi comprovada há exatamente um século. A descoberta do método de medir distâncias astronômicas muito grandes pela astrônoma Miss Leavitt marcou o passo fundamental para entender a natureza do universo em grande escala. Antes de sua descoberta da relação entre período e luminosidade para as estrelas variáveis Cefeidas, as distâncias astronômicas foram determinadas pelo método da paralaxe e triangulação

que alcançava na época distâncias de poucas centenas de anos-luz. O novo método permitiu a ela determinar, em 1912, uma distância de 200 mil anos-luz para a pequena nuvem de Magalhães, SMC (*Small Magellanic Cloud*), galáxia satélite da Via Láctea. O método foi desenvolvido por Miss Leavitt analisando placas fotográficas. Talvez ela teria sido a primeira pessoa a descobrir as enormes distâncias de numerosas galáxias no Grupo Local e além, mas no início do século XX, mulheres não tinham permissão de coordenar projetos de pesquisa e operar telescópios de grande

porte.

Em 1923, E. Hubble, astrônomo observador, usou o método período-luminosidade desenvolvido por Miss Leavitt e conseguiu determinar a distância de Andrômeda M 31, obtendo um valor em torno de 2 milhões de anos-luz, comprovando que se trata de um sistema estelar muito além dos limites da Via Láctea. Ele apresentou as observações realizadas no observatório do Mount Wilson em um trabalho denominado *Cefeidas em nebulosas espirais* (título original, *Cepheids in Spiral Nebulae*) em 1924 à Sociedade Americana de Astronomia (AAS). Poucos anos depois ele descobriu a expansão entre as galáxias o que hoje é um dos aspectos relevantes do modelo cosmológico padrão MCP.

Também é devido a E. Hubble a classificação das galáxias em galáxias espirais, elípticas e irregulares na chamada Sequência de Hubble. A classificação é feita de acordo com as características morfológicas das galáxias. Inicialmente acreditava-se que se trata de uma sequência de evolução, chamando as galáxias elípticas de galáxias tipo cedo (*early type galaxies*) e as galáxias espirais de tipo tardio (*late type galaxies*). Hoje sabemos que não se trata de uma sequência evolutiva, no entanto, há indícios de que galáxias espirais em colisão e posterior fusão podem resultar na formação de uma galáxia que aparece com um perfil de luminosidade típico de uma galáxia elíptica. Além das galáxias elípticas e espirais há uma classe de galáxias irregulares as quais mostram uma morfologia menos simétrica. No universo local, aproximadamente um terço das galáxias são irregulares.

1.1 Galáxias regulares

As galáxias que mostram uma morfologia regular são as galáxias espirais e as galáxias elípticas.

Observacionalmente, as galáxias espirais se destacam pelo alto brilho superficial central e, a depender dos filtros usados, nos braços espirais onde ocorre a formação de estrelas. As galáxias espirais em geral são galáxias grandes com massas da ordem de $10^9 M_{\odot}$ a $10^{12} M_{\odot}$, possuem altas velocidades rotacionais e grandes quantidades de gás e poeira que permitem a formação de estrelas até hoje [1]. As curvas de rotação das galáxias espirais observadas a partir dos anos 1980 mostra-

ram que deve existir matéria escura em grandes quantidades em torno das galáxias espirais. Uma explicação alternativa para as curvas de rotação que são quase constantes em grandes distâncias em relação ao centro da galáxia, seria uma modificação da lei da gravitação chamada MOND (*modified Newtonian dynamics*). Historicamente, a lei da gravitação foi deduzida a partir das leis de Kepler dos planetas do Sistema Solar, abrangendo distâncias menores que um milésimo de um parsec, enquanto as curvas de rotação das galáxias espirais abrangem distâncias de até 100 kpc.

As galáxias elípticas mostram uma distribuição em massa muito mais larga do que as galáxias espirais. As galáxias elípticas mais massivas, as chamadas galáxias cD, possuem massas acima de $10^{13} M_{\odot}$, portanto, são as galáxias mais massivas conhecidas no universo. As galáxias cD se encontram sempre nos exatos centros dinâmicos de aglomerados de galáxias, mas não todo aglomerado de galáxias possui uma galáxia cD. As observações e simulações numéricas indicam que as galáxias cD crescem ao longo do tempo pela fusão com outras galáxias do aglomerado.

As galáxias elípticas normais possuem massas luminosas semelhantes que as galáxias espirais. As galáxias elípticas em geral não mostram rotação regular e o método de determinar as massas que é usado nas galáxias espirais não pode ser aplicado. Como alternativa, pode ser aplicado o teorema virial sobre a dispersão de velocidades observada, para determinar a massa até a borda luminosa de uma galáxia elíptica. As galáxias elípticas não possuem gás e, portanto, hoje não pode ocorrer formação de estrelas. As estrelas de uma galáxia elíptica se formaram simultaneamente com a protogaláxia e são estrelas velhas e coevas. Os espectros de galáxias elípticas normais mostram grande contribuição de estrelas de tipo espectral K0 III.

Dentro dos aglomerados de galáxias há um gradiente radial entre galáxias elípticas e espirais. As galáxias elípticas em geral se encontram nas regiões centrais dos aglomerados enquanto que as galáxias espirais são encontradas mais distantes do centro do aglomerado. Acredita-se que o gradiente morfológico é resultado tanto do processo de formação das galáxias quanto de interações fortes e colisões entre as galáxias do aglomerado.

Uma das ideias mais simples sobre a formação

das galáxias é o colapso monolítico de uma protogaláxia [2]. Como as galáxias elípticas hoje se encontram em regiões mais densas, a hipótese básica é que as protogaláxias elípticas se formaram a partir de flutuações de densidade com amplitude maior que as protogaláxias espirais. Quanto maior é a densidade inicial da nuvem protogaláctica, tanto mais curto torna-se o tempo de colapso gravitacional e o tempo de converter o gás da nuvem em estrelas é muito mais curto ainda. Em consequência, nas protogaláxias elípticas o colapso é mais rápido do que nas protogaláxias espirais, e a formação de estrelas é tão eficiente que não sobra nem gás nem poeira ao final do colapso. A galáxia elíptica final adquire rapidamente um novo equilíbrio dinâmico com todo gás e poeira tendo se transformado em estrelas as quais possuem a mesma idade.

A densidade mais baixa das protogaláxias espirais resulta em um colapso mais lento e a formação de estrelas é muito menos eficiente. No final do colapso sobra uma grande parte de gás e poeira que forma um disco fino por dissipação. O colapso lento e o raio grande da protogaláxia espiral permitem transferência de momento angular com as galáxias vizinhas, resultando nas altas velocidades rotacionais observadas. A transferência de momento angular de acordo com esse mecanismo sendo chamado de torque de maré (*tidal torque mechanism*) foi verificado em simulações e mostra de forma consistente a origem do alto momento angular das galáxias espirais.

O cenário do colapso monolítico explica de uma forma muito simplificada a formação das galáxias e algumas das suas características mais salientes. No entanto, observações recentes indicam que a formação das galáxias é um processo longo de agregação de galáxias menores que continua até hoje e pode modificar constantemente as características observáveis da galáxia final. Nesse cenário atual, as galáxias anãs desempenham um papel fundamental.

1.2 Galáxias anãs

As galáxias elípticas anãs são as galáxias mais comuns em número no universo local, contudo, a sua contribuição para a massa luminosa é pequena. As galáxias elípticas anãs mais famosas são as galáxias satélites de Andromeda M 31, mas

Tabela 1: Galáxias anãs em torno da Via Láctea conhecidas antes de 2005.

Nome	Ano	D[kpc]	R[pc]	M_V
LMC		52	4300	-18,1
SMC		60	5800	-16,1
Sculptor	1937	86	280	-10,9
Fornax	1938	138	800	-13,3
Leo I	1950	250	270	-11,8
Leo II	1950	230	170	- 9,7
Ursa Minor	1954	75	400	- 9,0
Draco	1954	85	230	- 8,9
Carina	1977	105	300	- 9,4
Sextans	1990	95	450	- 9,0
Sagittarius	1994	21	2600	-13,5

existem várias galáxias elípticas anãs menores no Grupo Local [3]. Essas são chamadas de galáxias anãs esferoidais dSph (*dwarf spheroidal*).

As galáxias satélites da Via Láctea conhecidas antes de 2005 constam na Tabela 1. Na primeira coluna consta o nome e na segunda coluna o ano da descoberta. As nuvens de Magalhães LMC e SMC podem ser classificadas como galáxias irregulares e são visíveis sem telescópio. Na terceira coluna consta a distância em kpc e na quarta coluna consta o raio de meia-luz R em parsec, dentro do qual é emitida a metade da luminosidade. Na última coluna consta a magnitude absoluta no filtro V (visual). Para fins de comparação, o centro da Via Láctea se encontra em uma distância de 8 kpc. A magnitude absoluta do nosso Sol é $M_{V,\odot} = +4,8$. Uma magnitude absoluta $M_V = -10,2$ corresponde a uma luminosidade de $L_V = 10^6 L_\odot$, em que $L_\odot = 3,8 \times 10^{26} \text{ W}$ é a luminosidade solar.

A primeira galáxia anã satélite da Via Láctea, Sculptor, foi descoberta por Shapley em 1937. Depois dessa descoberta iniciou uma busca de galáxias anãs que continua até hoje. Com o desenvolvimento tecnológico foram descobertas mais galáxias anãs, mas o número não passou de uma dezena até o final do século XX. Do lado teórico havia expectativas bem fundamentadas da existência de mais galáxias anãs com baixas luminosidades.

2 A descoberta das galáxias anãs de brilho ultrabaixo UFD

Um dos levantamentos de imageamento mais extenso das últimas duas décadas é o SDSS (Sloan Digital Sky Survey).¹ Nesse rastreamento, trata-se de um estudo observacional realizado com um telescópio de 2,5 m e uma câmera de 120 megapixels que permite observar um campo de 1,5 graus quadrados com alta resolução angular. Foram observados mais que 200 milhões de objetos em uma área celeste de 8400 graus quadrados.

A análise dos dados observacionais do SDSS resultou entre 2005 e 2010 na detecção de uma dezena de novas galáxias anãs e a partir de 2015 foram descobertas mais trinta galáxias anãs, no SDSS e outros rastreios, totalizando até hoje um pouco mais que 50 galáxias satélites da Via Láctea.

As galáxias anãs conhecidas antes de 2005 possuem raios de meia-luz acima de 170 pc e luminosidades acima de $L_V = 2,5 \times 10^5 L_\odot$ que corresponde a uma magnitude absoluta de $M_V = -8,7$.

Em contraste, as galáxias anãs descobertas no SDSS possuem luminosidades até um fator de 1000 menor e raios de meia-luz de apenas 20 pc em casos extremos. As menos luminosas entre as novas galáxias anãs descobertas no SDSS mostram algumas propriedades fotométricas similares aos aglomerados globulares que dificultam a classificação como galáxia.

No entanto, a grande maioria das novas galáxias possui características que permitem uma classificação clara e as distinguem de aglomerados globulares. Entre essas características deve ser mencionada a cinemática estelar que mostra que as novas galáxias são dominadas por matéria escura, os raios que são maiores que os dos aglomerados globulares e as abundâncias de ferro Fe e de outros elementos químicos que mostram grandes variações, indicando formação estelar extensa e enriquecimento químico interno no passado.

As novas galáxias anãs foram denominadas de galáxias anãs de brilho ultrabaixo UFD (*ultra-faint dwarf galaxies*) pelo grupo que as primeiro descobriu [4].

¹<https://sdss.org/>

2.1 Definição de uma galáxia anã de brilho ultrabaixo UFD

Imediatamente depois da descoberta das novas galáxias anãs no SDSS não se tinha muita clareza sobre a sua natureza. Poucos anos depois da primeira descoberta, os dados espectroscópicos de estrelas individuais levaram à conclusão de que se trata realmente de galáxias. Ao longo de mais de dez anos de observações das galáxias anãs de brilho ultrabaixo, aumentou cada vez mais a evidência de que se trata de uma continuação da sequência das galáxias anãs esferoidais dSph em direção a luminosidades, massas, raios e metalicidades mais baixas. Portanto, parece que não se trata de uma nova classe de galáxias, mas apenas de galáxias com brilho superficial cada vez menor que torna a sua detecção cada vez mais difícil.

De acordo com as características observadas, foi proposta uma definição para galáxia UFD quando a mesma possui uma luminosidade menor que $L_V = 10^5 L_\odot$ correspondendo a uma magnitude absoluta $M_V = -7,7$. Entre as galáxias anãs descobertas no SDSS depois de 2005, apenas quatro galáxias não podem ser classificadas UFD de acordo com essa definição.

Canes Venatici I não foi descoberta antes por se encontrar em uma distância grande de $D = 210$ kpc. Trata-se de uma galáxia anã luminosa que possui magnitude absoluta $M_V = -8,7$, um raio grande acima de 400 pc e alta metalicidade. Crater II se encontra em uma distância de $D = 120$ kpc, possui magnitude absoluta $M_V = -8,2$ e com um raio de 1 kpc é por um fator quatro mais extensa que as outras galáxias anãs. Leo T encontra-se em uma distância de $D = 400$ kpc, tem magnitude absoluta $M_V = -8,0$ e possui gás neutro e recente formação de estrelas. Estas características são mais típicas para as galáxias anãs esferoidais dSph conhecidas antes da análise do SDSS. Mais uma galáxia, Eridanus II com $M_V = -7,1$, é atípica para as novas galáxias anãs de brilho ultrabaixo por conter um aglomerado estelar.

Segundo a proposta de Willman e Strader [5], uma galáxia é uma coleção de estrelas ligadas gravitacionalmente cujas propriedades não podem ser explicadas pela combinação de bárions e a lei da gravitação de Newton unicamente.

Essa definição pode ser interpretada no sen-

tido de exigir que a massa dinâmica de uma galáxia UFD seja consideravelmente maior que a sua massa bariônica ou que a metalicidade varie de uma estrela para outra. O primeiro critério indica diretamente a presença de matéria escura, o que não é o caso dos aglomerados globulares, o segundo critério sugere que o objeto se encontra dentro de um halo de matéria escura com massa suficiente para prender o material ejetado por uma supernova aumentando a metalicidade da subsequente geração de estrelas.

As galáxias anãs de brilho ultrabaixo descobertas no levantamento SDSS a partir de 2005, constam na Tabela 2. As galáxias foram escolhidas devido a dados observacionais mais completos, portanto, a classificação como UFD pode ser considerada como confirmada.

Na primeira coluna consta o nome e na segunda coluna a magnitude absoluta. Uma magnitude absoluta $M_V = -5,2$ corresponde a uma luminosidade de $L_V = 10^4 L_\odot$. O significado deste valor torna-se mais claro quando comparado, como exemplo, com Canopus, depois de Sirius a segunda estrela mais brilhante do céu noturno que possui uma magnitude absoluta $M_V = -5,5$. A luminosidade de uma única estrela como Canopus é maior que a luminosidade média das galáxias anãs de brilho ultrabaixo.

Na terceira coluna consta a distância em kpc e na quarta coluna o raio de meia-luz R em parsec. Na última coluna consta a metalicidade quantificada através da razão de ferro e hidrogênio $[\text{Fe}/\text{H}]$ (veja Seção 4). Os dados da Tabela 2 podem ser encontrados em vários artigos a exemplo de [6–10], entre outros da lista da bibliografia e artigos citados neles. A distância da grande maioria das galáxias é menor que 100 kpc. Essa distância corresponde a um módulo de distância $m - M = 20$. Uma estrela como o Sol tem nessa distância uma magnitude aparente de quase 25 mag. Como a maioria das galáxias da tabela possui uma distância menor, estrelas individuais com massa um pouco abaixo de uma massa solar estão dentro do alcance observacional de telescópios de grande porte.

Algumas galáxias anãs descobertas no SDSS ainda não foram classificadas UFD devido a dados espectroscópicos escassos ou com valores discrepantes, sendo como exemplo Triangulum II ($M_V = -1,6$, $D = 28$ kpc, $R = 16$ pc, $[\text{Fe}/\text{H}]$

Tabela 2: Galáxias anãs de brilho ultrabaixo descobertas depois de 2005 com classificação UFD confirmada.

Nome	M_V	D[kpc]	R[pc]	$[\text{Fe}/\text{H}]$
Segue 2	-2,0	37	40	-2,1
Hydrus I	-4,7	28	53	-2,5
Horologium I	-3,7	87	40	-2,8
Reticulum II	-4,0	32	50	-2,7
Eridanus II	-7,1	366	246	-2,4
Carina II	-4,5	36	92	-2,4
Ursa Major II	-4,4	35	140	-2,2
Segue 1	-1,3	23	24	-2,7
Ursa Major I	-5,1	100	295	-2,1
Willman 1	-2,9	45	33	-2,2
Leo V	-4,3	170	50	-2,5
Leo IV	-5,0	150	110	-2,3
Coma Beren.	-4,3	42	70	-2,4
Canes Ven.II	-5,2	160	70	-2,4
Boötes I	-6,0	66	190	-2,3
Boötes II	-2,9	42	40	-2,8
Hercules	-5,8	130	200	-2,5
Pegasus III	-4,1	200	80	-2,4
Aquarius II	-4,4	105	160	-2,3
Tucana II	-3,9	60	120	-2,9
Pisces II	-4,2	180	60	-2,5

$= -2,2$), Hydra II ($M_V = -4,9$, $D = 150$ kpc, $R = 70$ pc, $[\text{Fe}/\text{H}] = -2,0$), Draco II ($M_V = -0,8$, $D = 21$ kpc, $R = 20$ pc, $[\text{Fe}/\text{H}] = -2,7$) e Grus I ($M_V = -3,5$, $D = 120$ kpc, $R = 30$ pc, $[\text{Fe}/\text{H}] = -1,4$). A metalicidade de Grus I é muito maior do que esperado para um sistema tão pequeno. Uma explicação do valor alto de $[\text{Fe}/\text{H}]$ poderia ser contaminação (veja Seção 3.2), outra possibilidade seria efeito maré causando perda de estrelas individuais de Grus I.

A Figura 1 mostra a distribuição de magnitudes absolutas e raios de meia-luz R para aglomerados globulares, galáxias anãs e candidatos a galáxia anã. Os aglomerados globulares possuem raios $R < 20$ pc, enquanto que as galáxias anãs com brilho maior que $M_V < -4$ possuem raios maiores $R > 40$ pc. Com exceção de alguns candidatos a galáxia UFD com luminosida-

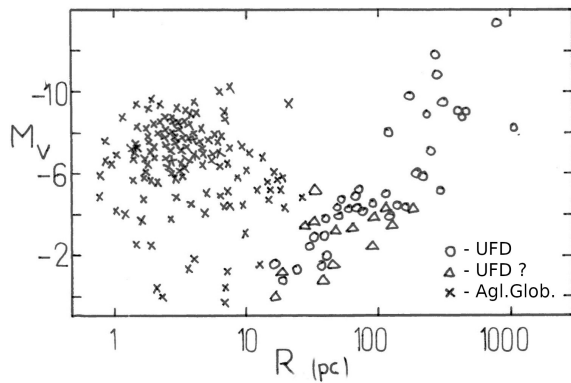


Figura 1: Magnitude absoluta M_V versus raio de meia-luz R [pc] para aglomerados globulares (x), galáxias anãs confirmadas (o) e candidatos a galáxia anã (Δ). A classificação é precisa para objetos mais luminosos que $M_V < -5$. Para objetos menos luminosos há, eventualmente, uma região em comum de aglomerados globulares e galáxias UFD. Figura adaptada com dados de [6] e [11].

des extremamente baixas, é possível distinguir as mesmas dos aglomerados globulares. No caso de luminosidades muito baixas não é sempre possível classificar os candidatos a galáxia UFD unicamente através dos parâmetros fotométricos. Observações futuras podem mostrar se existe uma região em comum de aglomerados e de galáxias anãs para raios entre 10 pc e 40 pc.

As galáxias anãs de brilho ultrabaixo possuem raios de meia-luz entre 24 pc (Segue I) e 295 pc (Ursa Major I) com alguns candidatos UFD com raios de até 15 pc em casos extremos. As galáxias anãs clássicas dSph possuem raios de meia-luz entre 170 pc (Leo II) e 2,6 kpc (Sagittarius).

Um estudo das elipticidades parece indicar uma elipticidade maior para as menores galáxias anãs. No entanto, um teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov não consegue excluir a possibilidade das elipticidades observadas das UFD e das dSph possuírem uma distribuição de elipticidades tridimensionais similar.

Um estudo morfológico parece indicar irregularidades na estrutura das galáxias anãs que poderiam ser resultado de interação gravitacional com a Via Láctea. Uma análise com ajuda de simulações de dados fotométricos mostrou que flutuações devido à estatística de Poisson podem resultar nas estruturas irregulares observadas em regiões de brilho superficial muito baixo.

2.2 Cinemática estelar

O primeiro passo no estudo observacional das novas galáxias anãs consistiu em determinar as velocidades radiais de estrelas individuais. As primeiras observações espectroscópicas foram obtidas para Ursa Major I e Boötes I. Os espectros de cinco estrelas de Ursa Major I permitiram determinar uma dispersão de velocidades $\sigma = 9,3 \text{ km s}^{-1}$ [12] e espectros de sete estrelas de Boötes I resultaram em $\sigma = 6,6 \text{ km s}^{-1}$ [13]. Ao considerar as luminosidades $L_V = 9600 L_\odot$ e $L_V = 21900 L_\odot$ das duas galáxias anãs, respectivamente, e supondo uma razão massa-luminosidade de $M/L = 2$ (em unidades solares) que é típica para uma população velha de estrelas com $M = 0,8 M_\odot$, a dispersão de velocidades esperada teria que ser menor que $\sigma < 0,1 \text{ km s}^{-1}$.

Sob a hipótese de se tratar de sistemas estelares em equilíbrio dinâmico e na ausência de estrelas contaminadoras da Via Láctea, a conclusão menos controversa é que essas galáxias não podem ser puramente sistemas bariônicos.

Observações espectroscópicas subsequentes [14, 15] confirmaram os primeiros resultados cinemáticos surpreendentes. A dispersão de velocidades de 27 galáxias classificadas como galáxia anã de brilho ultrabaixo versus magnitude absoluta está representada na Figura 2. Dois erros típicos da dispersão de velocidades são indicados na figura, com erros sendo muito maiores em poucos casos extremos. Pode se constatar que a grande maioria das galáxias anãs de brilho ultrabaixo mostra uma dispersão de velocidades entre 3 km s^{-1} e 7 km s^{-1} . Não se observa uma tendência entre dispersão de velocidades e luminosidade da galáxia, esse comportamento sendo diferente das galáxias anãs esferoidais dSph nas quais a dispersão de velocidades aumenta com a luminosidade.

3 Massas das galáxias UFD e matéria escura

A dispersão de velocidades obtida a partir das velocidades radiais de estrelas individuais em cada galáxia pode ser usada para determinar a sua massa dinâmica. A conversão da dispersão de velocidades para a massa dinâmica é possível sob algumas hipóteses básicas. Depois de comparar

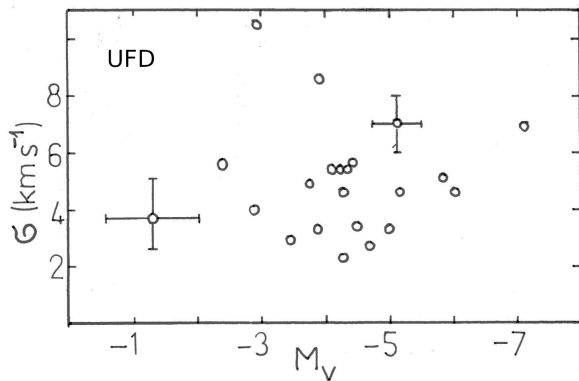


Figura 2: Dispersão de velocidades σ [km s^{-1}] ao longo da linha de visada versus magnitude absoluta M_V para galáxias UFD. Dois erros observacionais típicos são indicados. Algumas poucas galáxias anãs possuem erros significativamente maiores. A distribuição não mostra uma correlação clara entre σ e M_V . Figura adaptada com dados de [6, 14–16] e referências citadas.

a massa dinâmica com a massa estelar luminosa pode ser quantificada a matéria escura.

3.1 Equilíbrio dinâmico

Para determinar uma massa dinâmica confiável, o sistema estelar deve se encontrar em equilíbrio dinâmico. Nesse caso pode ser aplicado o teorema Virial. Se a galáxia teve uma colisão com outro sistema de alta massa no passado recente, a dispersão de velocidades pode desviar consideravelmente do valor de equilíbrio e resultar em uma estimativa errônea de massa. Em torno das galáxias que possuem valores conhecidos da dispersão de velocidades, não são observados objetos de alta massa que podem ter causado um aumento dramático na dispersão de velocidades. Somente massas escuras muito concentradas a exemplo de buracos negros de alta massa, poderiam causar um aumento na dispersão de velocidades sem deixar nenhum rastro visível na sua vizinhança. Por outro lado, uma perturbação violenta deste tipo provavelmente deixaria a morfologia da galáxia anã perturbada por muito tempo o que em geral não é observado.

Uma passagem perto do centro da Via Láctea pode igualmente causar uma perturbação devido a forças de maré e resultar em massas errôneas. Os movimentos próprios das galáxias anãs de brilho ultrabaixo determinados pelo satélite Gaia²

²<https://sci.esa.int/web/gaia>.

mostram que a maioria das galáxias anãs se encontra próximo ao pericentro na órbita em torno da Via Láctea, mas a distância típica do pericentro de 40 kpc resulta em efeito maré não relevante para a dispersão de velocidades.

3.2 Contaminação

A contaminação da amostra de estrelas individuais nas galáxias anãs devido a estrelas da Via Láctea que se encontram ao longo da linha de visada ou devido a estrelas binárias dentro das galáxias anãs deve ser considerada.

A contaminação por estrelas de primeiro plano pode ser minimizada combinando dados espectroscópicos com os movimentos próprios disponíveis. Em uma análise detalhada foram detectadas algumas estrelas que contaminam a amostra, mas o efeito sobre a dispersão de velocidades foi menor que 10%, reduzindo em um caso de $\sigma = 7,6 \text{ km s}^{-1}$ para $\sigma = 6,9 \text{ km s}^{-1}$. Uma pré-seleção de candidatos de estrelas pertencentes à galáxia anã muitas vezes é feita pela velocidade radial. Portanto, uma estrela com velocidade discrepante pode ser excluída antes de determinar a dispersão de velocidades. Devido ao critério de pré-seleção, o efeito de contaminação pode ser maior na determinação da metalicidade.

Estrelas binárias foram confirmadas nas galáxias anãs [17, 18], e as mesmas podem aumentar a dispersão de velocidades quando os parâmetros orbitais mostram uma contribuição alta na velocidade radial. Velocidades altas somente ocorrem em estrelas binárias cerradas sendo estes sistemas de curto período orbital. O único caso de uma estrela binária em uma galáxia UFD com parâmetros orbitais conhecidos é na galáxia anã Hercules com período orbital de 135 dias e com uma variação da velocidade radial $\Delta v = \pm 14 \text{ km s}^{-1}$ [18]. Alguns outros casos de estrelas binárias com dados orbitais menos completos parecem ter amplitudes na velocidade entre 10 km s^{-1} e 20 km s^{-1} e períodos menores que um ano.

A maneira mais fácil de excluir as estrelas binárias é, portanto, observar as estrelas individuais em épocas diferentes. Dessa maneira foram detectadas várias estrelas binárias as quais não aumentaram os valores da dispersão de velocidades das 27 galáxias de maneira significativa.

3.3 Massa dinâmica e matéria escura

O teorema Virial escalar na sua forma mais simples pode ser escrito

$$2T + V = 0, \quad (1)$$

onde T representa a energia cinética e V a energia potencial. O teorema Virial nessa forma vale para um sistema autogravitante idealizado que se encontra em equilíbrio dinâmico. Para um sistema autogravitante de N partículas, a energia cinética pode ser escrita por $T = \sum_{i=1}^N m_i v_i^2 / 2$ e a energia potencial $V = \sum_{i<j}^N G m_i m_j / r_{ij}$. Para aplicar o teorema a um sistema autogravitante, a dispersão de velocidades σ determinada através da velocidade radial deve ser corrigida pelo fator de projeção na esfera celeste para obter a velocidade tridimensional. Se as órbitas tridimensionais não são conhecidas, deve-se corrigir a velocidade de maneira estatística. Através da observação da dispersão de velocidades σ e supondo uma distribuição aleatória (quando aplicável) das velocidades, $v_x \approx v_y \approx v_z$, obtém-se estatisticamente a velocidade tridimensional $v^2 = 3\sigma^2$. Observando a distância em projeção entre os N corpos e corrigindo da mesma forma estatística, obtém-se as distâncias tridimensionais r_{ij} . Com o teorema Virial pode se obter finalmente a massa dinâmica total do sistema $\sum_i^N m_i$. Em caso da presença de matéria escura, a mesma aumenta a dispersão de velocidades através da energia potencial mas não contribui para a massa luminosa.

Em uma abordagem mais sofisticada através das equações de Jeans, pode ser derivado o teorema Virial em sua forma tensorial,

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 I_{jk}}{dt^2} = 2T_{jk} + \Pi_{jk} + W_{jk}, \quad (2)$$

onde I_{jk} é o tensor do momento de inércia, T_{jk} é o tensor dos movimentos ordenados de escoamento, Π_{jk} é o tensor dos movimentos aleatórios e W_{jk} é o tensor da energia potencial (e.g. [19]). Esse teorema permite, a princípio, analisar sistemas fora do equilíbrio dinâmico. No caso de aplicação a sistemas autogravitantes que se encontram em equilíbrio dinâmico, o momento de inércia I_{jk} é constante e a parte esquerda da (2) é igual a zero. O tensor da energia cinética $K_{jk} = T_{jk} + \Pi_{jk}/2$ permite considerar ve-

locidades anisotrópicas as quais ocorrem frequentemente em sistemas autogravitantes.

Por exemplo, as velocidades estelares na vizinhança solar são descritas por um chamado elipsoide de Schwarzschild que descreve uma dispersão de velocidades diferente para cada coordenada galáctica (u, v, w) . Em direção radial u , i.e. em direção ao centro galáctico, a dispersão de velocidades estelares σ_u é significativamente maior do que em direção azimutal (acompanhando a rotação galáctica) ou em direção polar (perpendicular ao disco da Via Láctea).

Uma dispersão anisotrópica também foi usada nos anos 1990 para determinar a massa que se encontra no centro da Via Láctea na posição da radiofonte Sgr A. Um resumo breve desse método pode ser encontrado em [20]. Em anos recentes foi observada pela colaboração EHT (Event Horizon Telescope) a sombra do buraco negro Sgr A*, confirmando uma massa de $4 \times 10^6 M_\odot$. Um resumo das observações e modelos teóricos pode ser encontrado em [21].

Wolf et al. [16] mostraram que no caso de sistemas autogravitantes com anisotropia desconhecida de velocidades, a massa dinâmica mais confiável é a massa $M_{1/2}$ que se encontra dentro do raio $r_{1/2}$, $M_{1/2} = M(r < r_{1/2})$. Aqui, $r_{1/2}$ é o raio tridimensional dentro do qual é emitida a metade da luminosidade do sistema. De acordo com [16], a massa $M_{1/2}$ é dada por

$$M_{1/2} = 930 \left(\frac{\sigma}{\text{km s}^{-1}} \right)^2 \left(\frac{R}{\text{pc}} \right) M_\odot, \quad (3)$$

onde σ é a dispersão de velocidades e R é o raio de meia-luz, que é diretamente observável. Para muitos perfis de luminosidade vale a relação $r_{1/2} = (4/3) R$.

A Figura 3 mostra as massas dinâmicas $M_{1/2}$ determinadas até o raio tridimensional de meia-luz $r_{1/2}$ de acordo com (3). As massas dinâmicas variam entre $10^5 M_\odot$ e $10^8 M_\odot$ para luminosidades entre $10^3 L_\odot$ e $10^7 L_\odot$. A partir de massa e luminosidade pode ser determinada a razão massa-luminosidade M/L . A análise dos dados mostra que as galáxias anãs de brilho ultrabaixo menos luminosas possuem os maiores valores acima de $M/L > 1000$ o que torna as mesmas as galáxias mais dominadas por matéria escura [22].

A natureza da matéria escura permanece desconhecida. Uma parte significativa de matéria

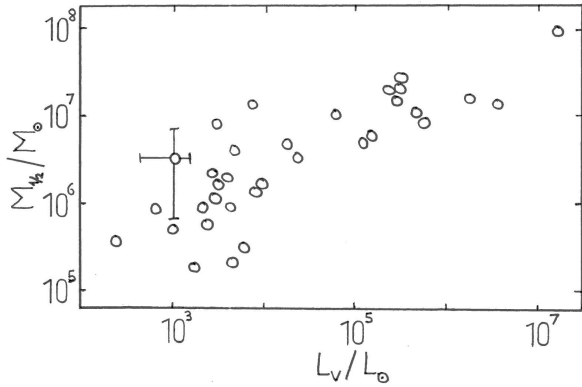


Figura 3: Massa dinâmica $M_{1/2}$ dentro do raio tridimensional de meia-luz $r_{1/2}$ versus luminosidade L_V em unidades solares para galáxias anãs de brilho ultrabaixo. Um erro típico é indicado. Algumas das galáxias menos luminosas têm erros maiores, nas galáxias mais luminosas, os erros são menores que o símbolo. As massas dinâmicas variam entre $10^5 M_{\odot}$ a $10^8 M_{\odot}$ e as luminosidades entre $10^3 L_{\odot}$ e $10^7 L_{\odot}$ resultando em razão massa-luminosidade M/L muito maior que nas galáxias anãs esferoidais dSph, indicando a presença de quantidades consideráveis de matéria escura. Figura adaptada com dados de [6, 14–16] e referências citadas.

escura bariônica poderia ser em forma de estrelas compactas ou buracos negros sendo estes os estágios finais da evolução estelar. Nas galáxias anãs de brilho ultrabaixo somente são encontradas estrelas velhas com idades superiores a 11 Ga (1 Ga = 10^9 anos) e, portanto, hoje somente podem ser observadas estrelas com uma massa abaixo de $M < 0,8 M_{\odot}$. Se a função de massa estelar inicial IMF (*initial mass function*) nessas galáxias for sistematicamente diferente que na Via Láctea, seria possível que uma enorme quantidade de anãs brancas ou estrelas de nêutrons esteja presente nessas galáxias.

O exemplo clássico mais conhecido de anã branca é o caso de Sirius B. Sirius A com uma magnitude aparente $m_V = -1,45$ mag é a estrela mais brilhante do céu noturno, encontra-se em uma distância de 2,64 pc e possui uma massa de $M_{Sir,A} = 2,12 M_{\odot}$. O movimento próprio de Sirius A na esfera celeste mostra pequenos desvios com uma periodicidade de 50 anos, refletindo a órbita de Sirius A nesse sistema binário. No ano 1862, foi descoberta a outra componente do sistema estelar binário tendo magnitude aparente $m_V = 8,5$ mag, Sirius B, sendo uma anã branca com uma massa de $M_{Sir,B} = 0,98 M_{\odot}$. Apesar de

ter uma massa quase da metade de Sirius A, a sua luminosidade é menor por um fator de dez mil. Mesmo uma grande quantidade de anãs brancas na distância típica das galáxias anãs de brilho ultrabaixo não seria detectável com a tecnologia observacional atual.

Uma eventual grande quantidade de anãs brancas presentes nas galáxias UFD requer uma função de massa inicial com um máximo acima de uma massa solar para garantir a fase final do colapso ter terminado no passado sem deixar rastros observáveis até hoje.

A mudança da função de massa inicial IMF teria que ser mais dramática ainda, se uma grande parte da matéria escura hoje se encontrasse em estrelas de nêutrons ou buracos negros estelares. A massa inicial de uma estrela deve ser acima de oito massas solares para a estrela terminar sua evolução como estrela de nêutrons ou buraco negro. A vantagem seria um tempo de evolução muito mais curto. Um número muito elevado de supernovas poderia resultar em metalicidades altas discrepantes se o potencial gravitacional consegue prender o material ejetado pelas supernovas. A existência de estrelas de nêutrons parece provável devido a presença de elementos químicos que são resultado do processo-r [17] que pode ocorrer durante a fusão de duas estrelas de nêutrons. Processo-r se refere à captura rápida de nêutrons na síntese de núcleos pesados. Ainda faltam outros indícios teóricos e observacionais para apoiar essa hipótese muito especulativa de uma numerosa população de estrelas de nêutrons ou buracos negros.

Uma outra alternativa, e no momento a que menos gera discussões controversas, é a hipótese de se tratar de matéria escura não bariônica. Nesse caso, as galáxias anãs de brilho ultrabaixo seriam o ambiente mais apropriado para estudar as características da matéria escura não bariônica em pequena escala de poucos parsecs.

4 Metalicidade das galáxias UFD

A metalicidade Z normalmente é definida pela razão da massa de todos metais M_Z (a partir de lítio Li) e da massa de todos elementos incluindo as massas de hidrogênio (X) e hélio (Y), $Z = M_Z / (M_X + M_Y + M_Z)$. A determinação

precisa da metalicidade requer uma análise detalhada de todas as linhas espectrais de uma estrela e, portanto, um espectro de alta qualidade. No caso do Sol, a análise detalhada de milhares de linhas espectrais resulta em uma metalicidade em torno de $Z_{\odot} \sim 0,02$.

No entanto, os espectros de estrelas com magnitudes perto do limite observacional muitas vezes não permitem uma análise quantitativa para todos os metais presentes na estrela. Nesse caso, em um primeiro passo, são usadas as linhas de ferro Fe, calculando a razão do número de átomos de ferro Fe em relação aos átomos de hidrogênio H. O índice comumente usado é $[Fe/H]$ sendo definido por [19]

$$[Fe/H] = \log \left[\frac{N_{Fe}/N_H}{(N_{Fe}/N_H)_{\odot}} \right], \quad (4)$$

onde N_{Fe} é o número de átomos de ferro e N_H é o número de átomos de hidrogênio. O índice $[Fe/H]$ é dado pelo logaritmo da razão dos números de átomos de ferro e de hidrogênio dividido pela razão dos números encontrados no Sol. Deve-se notar que a metalicidade determinada assim se refere aos números de átomos enquanto que a metalicidade Z se refere à massa dos átomos.

A Figura 4 mostra as metalicidades $[Fe/H]$ versus magnitude absoluta para galáxias anãs de brilho ultrabaixo UFD e para galáxias anãs esferoidais dSph. Observa-se uma clara tendência com a metalicidade diminuindo quando a luminosidade diminui, a qual pode ser descrita por uma relação proposta por Kirby et al. [23] e sendo válida para todas as galáxias anãs do Grupo Local,

$$[Fe/H] = -1,68 + 0,29 \log \left(\frac{L_V}{10^6 L_{\odot}} \right), \quad (5)$$

onde L_V é a luminosidade da galáxia anã no visual. As galáxias anãs esferoidais dSph seguem essa relação dentro dos erros observacionais e as galáxias anãs de brilho ultrabaixo se encontram na continuação dessa tendência, mas os erros aumentam consideravelmente para brilho menor que $M_V > -5,5$. Na literatura original continua sendo discutido se o motivo da dispersão maior dos valores $[Fe/H]$ são erros aleatórios observacionais ou se há uma variação sistemática devido a efeitos ambientais, como a perda de estrelas devido a efeito maré no campo gravitacional da Via Láctea.

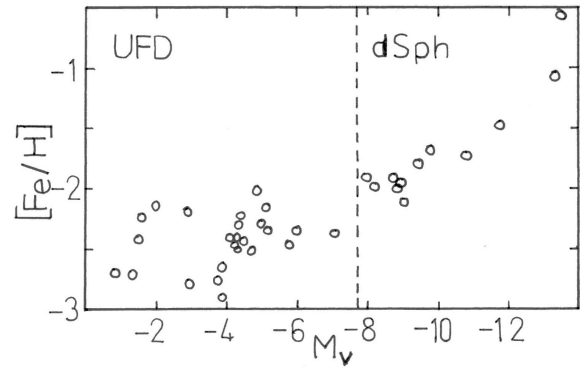


Figura 4: Metalicidade $[Fe/H]$ versus magnitude absoluta M_V para galáxias anãs UFD (esquerda) e para galáxias anãs esferoidais dSph (direita). As galáxias anãs com as luminosidades mais baixas mostram metalicidades por um fator de cem até mil vezes menor que no caso do Sol. Figura adaptada com dados de [6, 18, 24–26].

Um índice $[Fe/H] = -2$ para as galáxias anãs de brilho ultrabaixo significa que há um número de átomos de Fe em relação a hidrogênio por um fator 100 menor que no Sol, e um índice $[Fe/H] = -3$ corresponde a um fator de 1000. Os índices $[Fe/H]$ das galáxias anãs de brilho ultrabaixo mostram que essas são as galáxias conhecidas mais deficientes em metais.

Existem outros índices, a exemplo de $[Mg/H]$, $[Ba/H]$, $[Sr/H]$, $[Eu/H]$, que são usados no estudo das galáxias anãs de baixo brilho quando linhas de magnésio Mg, de bário Ba, de estrôncio Sr ou de európio Eu são detectadas nos espectros estelares com uma intensidade suficientemente alta para permitir uma análise quantitativa [24]. Um índice particularmente importante no estudo das galáxias anãs é $[\alpha/H]$ onde α representa o número total de núcleos de elementos alfa. Elementos alfa são átomos cujos núcleos possuem um número par de prótons e um número igual de nêutrons, i.e. são múltiplos inteiros do núcleo de hélio, a exemplo de ${}^{12}_6C$, ${}^{16}_8O$, ${}^{20}_{10}Ne$, ${}^{24}_{12}Mg$, ${}^{28}_{14}Si$, ${}^{32}_{16}S$, ${}^{36}_{18}Ar$, ${}^{40}_{20}Ca$.

O estudo observacional da metalicidade mostra que as galáxias UFD possuem metalicidades mais baixas do que as galáxias anãs clássicas dSph, e que as estrelas de uma galáxia anã mostram valores diferentes, o que não é observado no caso dos aglomerados globulares que possuem metalicidades iguais dentro dos erros observacionais.

Em muitas galáxias anãs de brilho ultrabaixo foram encontradas estrelas extremamente deficientes em metais com $[Fe/H] < -3$. A variação de

metalidade dentro de uma galáxia indica que a formação de estrelas deve ter continuado sobre um intervalo de tempo suficientemente longo para permitir que o material liberado por supernovas possa se espalhar na vizinhança. O material enriquecido quimicamente deve ser agregado em uma nuvem que entra em colapso gravitacional posteriormente. A variação de metalidade também indica que o potencial gravitacional deve ser profundo o suficiente para prender o material ejetado pelas supernovas. Se existissem somente as estrelas luminosas nessas galáxias, a velocidade de expansão do envelope da supernova que é da ordem de quase um décimo da velocidade da luz, seria o suficiente para o material se espalhar no espaço intergaláctico, principalmente se a supernova se encontra em uma distância grande do centro da galáxia. Modelos idealizados mostram que um halo de matéria escura com uma massa de $10^7 M_{\odot}$ consegue prender o material ejetado por uma supernova enquanto que halos de massa menor perdem o material [25].

Na discussão da importância de supernovas deve ser distinguido entre supernovas de colapso da região central (*core collapse supernova*) que ocorre no final da evolução de uma estrela individual de alta massa [27] e supernovas tipo Ia que são resultado de uma anã branca que ultrapassa a massa de Chandrasekhar devido a transferência de material da outra componente em um sistema estelar binário. As SN Ia não dependem diretamente do tempo evolutivo de estrelas e, portanto, não ocorrem apenas em estrelas jovens de alta massa.

5 Populações estelares nas galáxias UFD

A análise das populações estelares indica que a maioria das estrelas nas galáxias UFD se formou em alto *redshift* acima de $z \sim 10$ e que a formação de estrelas pode ter continuado até o fim da época de reionização em $z \sim 6$. Uma exceção é Ursa Major I que conseguiu formar apenas a metade das estrelas até $z \sim 3$. Nesse sentido, as galáxias UFD são os remanescentes mais autênticos da época de reionização.

As metalidades baixas das galáxias UFD as tornam o ambiente mais extremo conhecido no qual ocorreu formação de estrelas e permitem es-

tudar a dependência da função de massa inicial IMF do ambiente. Uma diferença grande com os aglomerados globulares é que as densidades estelares baixas implicam que não houve evolução dinâmica desde a formação das galáxias UFD. A vantagem é que a função de massa observada hoje é idêntica com a função de massa inicial para baixas massas estelares até o ponto de saída da sequência principal de idade zero.

Uma primeira análise das populações estelares em Hercules, Leo IV e Ursa Major I mostrou que as estrelas possuem a mesma idade sendo igual ou maior que a idade das estrelas em M 92, um dos mais velhos aglomerados globulares conhecidos [28]. Uma análise espectroscópica mais detalhada nessas galáxias e em Boötes I, Canes Venatici II e Coma Berenices mostrou que 75% das estrelas nessas galáxias se formou em *redshift* maior que $z \sim 10$. A grande maioria das estrelas se formou antes do final da época de reionização $z \sim 6$, consistente com a ideia de que o aquecimento do gás devido à reionização do universo deve ter finalizado o processo de formação de estrelas nessas galáxias [29].

A formação de estrelas não termina de maneira abrupta em todas essas galáxias uma vez que podem existir isoladamente algumas nuvens moleculares de alta densidade as quais podem sobreviver por algum tempo posterior. De um lado foi demonstrado que 90% das estrelas em Hercules e Leo IV são mais velhas que 11 Ga e do outro lado que formação de estrelas deve ter continuado até 8 Ga atrás em Canes Venatici II [26].

A função de massa inicial IMF em Hercules e Leo IV observada no intervalo estreito de massas estelares entre $0,5 M_{\odot}$ e $0,8 M_{\odot}$ sugere uma função de massa inicial com menos estrelas de baixa massa e mais estrelas com alta massa em comparação com a Via Láctea.

Em consequência, deveria ter um número elevado de supernovas durante a evolução da galáxia anã. Estimativas variam entre 15 SN e mais que 250 SN para a galáxia anã Segue 1 que hoje possui uma massa estelar luminosa em torno de $500 M_{\odot}$. Se esse cenário for confirmado, terá implicações importantes sobre a quantidade de matéria escura bariônica nessas galáxias.

A única galáxia anã descoberta no SDSS que possui gás neutro é Leo T. Apesar da sua descoberta com os mesmos métodos que as galáxias

UFD, com base em dados espectroscópicos, Leo T é classificada como dSph. Nas demais galáxias UFD, gás neutro não pode ser detectado e o limite superior para a massa do gás neutro da maioria das galáxias UFD é da ordem de $M_{gas} \sim 100 M_{\odot}$. Somente para as galáxias UFD com distâncias acima de 100 kpc o limite observacional para a massa do gás neutro poderia ser por um fator de até dez maior.

Gás ionizado não foi detectado em nenhuma galáxia UFD. A eventual detecção de emissão H α poderia impor limites sobre a quantidade do gás.

A ausência de gás nas galáxias UFD poderia ser causada por vários mecanismos. Uma possibilidade discutida é que na época de reionização do universo poderia ter sido removido o gás restante nas galáxias UFD e dessa forma ter interrompido o processo de formação de estrelas. É o mecanismo que explica o fato de se tratar de uma população de estrelas coevas nas galáxias UFD.

Outro mecanismo possível seria a perda do gás durante eventos de supernovas que poderiam expelir o gás junto com o material ejetado durante a explosão se o potencial gravitacional da galáxia não for profundo o suficiente para prender o material ejetado com velocidades iniciais de quase um décimo da velocidade da luz.

A função luminosidade das galáxias UFD está sendo discutida ainda de maneira controversa. As galáxias UFD observadas até hoje mostram um máximo em torno de $M_V \sim -4$, implicando que o máximo real deve se encontrar em luminosidades mais baixas. De acordo com alguns estudos, a maioria das galáxias UFD teria sido descoberta até hoje, mas outros estudos extrapolam o número total de galáxias satélites da Via Láctea para além de 300. Os números podem ser maiores ainda se muitas galáxias anãs se encontram em distâncias bem maiores que 100 kpc.

6 A importância cosmológica das galáxias anãs de brilho ultrabaixo

As galáxias UFD possuem as menores metalicidades, são os sistemas estelares mais velhos, de menor tamanho, com o menor conteúdo estelar e possuem, provavelmente, a mais simples história de agregação de matéria entre todas galáxias. Portanto, as galáxias anãs de brilho ultrabaixo

representam o limite extremo do processo de formação de galáxias.

Tanto as observações quanto modelos teóricos indicam que as galáxias anãs de brilho ultrabaixo se formaram em alto *redshift* antes da época de reionização e, diferente das demais galáxias, não evoluíram depois da primeira formação de estrelas. Portanto, são essas as galáxias mais autênticas tendo preservado até hoje nas suas características observáveis as condições físicas da época da primeira formação de estrelas e galáxias no universo.

As galáxias anãs de brilho ultrabaixo encontram-se nos menores halos de matéria escura conhecidos com massas da ordem de $10^8 M_{\odot}$ no momento da formação de estrelas [30] e são, entre os sistemas estelares conhecidos, os com mais baixa fração de matéria bariônica. Essa combinação torna as novas galáxias anãs valiosos laboratórios para estudar a natureza da matéria escura. A expectativa é que as densidades centrais e os perfis de densidade das galáxias anãs de brilho ultrabaixo possam permitir estudar o comportamento de matéria escura em escalas de poucos parsecs.

A formação das primeiras galáxias no universo depende criticamente do mecanismo de esfriamento da nuvem protogaláctica de gás a temperaturas suficientemente baixas para permitir a formação de estrelas. Os minihalos de matéria escura com massas entre $10^6 M_{\odot}$ e $10^8 M_{\odot}$ podem esfriar através de hidrogênio molecular e são os melhores candidatos para a formação das primeiras estrelas no universo, a hipotética População III, para *redshift* em torno de $z \sim 20$. Minihalos com massas acima de $10^8 M_{\odot}$ podem esfriar através de linhas atômicas de hidrogênio e podem colapsar um pouco mais tarde em torno de *redshift* $z \sim 10$.

Simulações numéricas da formação das primeiras estrelas e das primeiras galáxias são extremamente complexas e ainda não permitem distinguir entre diferentes cenários. As simulações mais recentes parecem indicar que as massas dos minihalos de matéria escura variam sobre várias ordens de grandeza e sugerem que, no limite inferior de massa, muitos dos minihalos podem permanecer para sempre completamente escuros sem jamais formar estrelas.

7 Conclusão

As galáxias de brilho ultrabaixo UFD no limite inferior em luminosidade são os sistemas estelares luminosos associados com os menores minihalos capazes de formar estrelas.

As observações espectroscópicas e modelos teóricos indicam que a formação de estrelas na maioria das galáxias UFD terminou há 12 bilhões de anos. Nas galáxias UFD de mais baixa massa, o processo de formação de estrelas foi interrompido na época de reionização do universo. Essa ideia é consistente com os dados observacionais disponíveis, mas a amostra de galáxias anãs de mais baixa luminosidade ainda é pequena e falta uma história completa e precisa do processo de formação estelar. Se esse cenário for confirmado no futuro, as novas galáxias UFD realmente representariam uma nova classe de galáxias.

Sobre o autor

Rainer Madejsky (rainer.madejsky@gmail.com) é professor pleno do Departamento de Física da Universidade Estadual de Feira de Santana. Possui doutorado em Física pela Universidade de Heidelberg (Alemanha) e realizou pós-doutorados na Alemanha, na França e no Chile. Desenvolve pesquisas na área de astrofísica com ênfase em galáxias e cosmologia observacional.

Referências

- [1] M. Jones e R. Lambourne, *An Introduction to Galaxies and Cosmology* (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2004).
- [2] J. Silk, *O Big Bang - A origem do Universo* (Universidade de Brasília, 1988).
- [3] S. van den Bergh, *The Galaxies of the Local Group* (Cambridge University Press, 2007).
- [4] B. Willman et al., *A new Milky Way companion: unusual globular cluster or extreme dwarf satellite?*, [The Astronomical Journal](#) **129**(6), 2692 (2005).
- [5] B. Willman e J. Strader, *“Galaxy,” defined*, [The Astronomical Journal](#) **144**(3), 76 (2012).
- [6] J. D. Simon, *The faintest dwarf galaxies*, [Annual Review of Astronomy and Astrophysics](#) **57**(1), 375 (2019).
- [7] A. Drlica-Wagner et al., *Eight ultra-faint galaxy candidates discovered in year two of the dark energy survey*, [The Astrophysical Journal](#) **813**(2), 109 (2015).
- [8] R. R. Muñoz et al., *A MegaCam survey of outer halo satellites. III. Photometric and structural parameters*, [The Astrophysical Journal](#) **860**(1), 66 (2018).
- [9] S. E. Koposov et al., *Snake in the Clouds: a new nearby dwarf galaxy in the Magellanic bridge*, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#) **479**(4), 5343 (2018).
- [10] B. Willman et al., *Willman 1—a probable dwarf galaxy with an irregular kinematic distribution*, [The Astronomical Journal](#) **142**(4), 128 (2011).
- [11] W. E. Harris, *A catalog of parameters for globular clusters in the Milky Way*, [Astronomical Journal](#) **112**, 1487 (1996).
- [12] J. T. Kleyana et al., *Ursa Major: a missing low-mass CDM halo?*, [The Astrophysical Journal](#) **630**(2), L141 (2005).
- [13] R. R. Muñoz et al., *Exploring halo substructure with giant stars: the dynamics and metallicity of the dwarf spheroidal in Boötes*, [The Astrophysical Journal](#) **650**(1), L51 (2006).
- [14] N. F. Martin et al., *A Keck/DEIMOS spectroscopic survey of faint Galactic satellites: searching for the least massive dwarf galaxies*, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#) **380**(1), 281 (2007).
- [15] J. D. Simon e M. Geha, *The kinematics of the ultra-faint Milky Way satellites: solving the missing satellite problem*, [The Astrophysical Journal](#) **670**(1), 313 (2007).

- [16] J. Wolf et al., *Accurate masses for dispersion-supported galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **406**(2), 1220 (2010).
- [17] A. P. Ji et al., *R-process enrichment from a single event in an ancient dwarf galaxy*, *Nature* **531**(7596), 610 (2016).
- [18] A. Koch et al., *Neutron-capture element deficiency of the Hercules dwarf spheroidal galaxy*, *Astronomy & Astrophysics* **554**, A5 (2013).
- [19] R. K. Madejsky, *Curso Básico de Astrofísica e Cosmologia*, vol. 2 – Das galáxias aos quasares (UEFS Editora, Feira de Santana, 2015).
- [20] R. Madejsky, *Curso Básico de Astrofísica e Cosmologia*, vol. 1 – O sistema solar, as estrelas e a Via Láctea (UEFS Editora, Feira de Santana, 2014).
- [21] R. K. Madejsky, *Buracos negros supermassivos: III. Sagitário A* no centro da Via Láctea*, *Caderno de Física da UEFS* **20**(1), 1404.1–8 (2023).
- [22] M. Geha et al., *The least-luminous galaxy: spectroscopy of the Milky Way satellite Segue 1*, *The Astrophysical Journal* **692**(2), 1464 (2009).
- [23] E. N. Kirby et al., *The universal stellar mass-stellar metallicity relation for dwarf galaxies*, *The Astrophysical Journal* **779**(2), 102 (2013).
- [24] L. C. Vargas et al., *The distribution of alpha elements in ultra-faint dwarf galaxies*, *The Astrophysical Journal* **767**(2), 134 (2013).
- [25] D. Webster, R. Sutherland e J. Bland-Hawthorn, *Ultrafaint dwarfs—star formation and chemical evolution in the smallest galaxies*, *The Astrophysical Journal* **796**(1), 11 (2014).
- [26] D. R. Weisz et al., *The star formation histories of local group dwarf galaxies. I. Hubble space telescope/wide field planetary camera 2 observations*, *The Astrophysical Journal* **789**(2), 147 (2014).
- [27] B. W. Carroll e D. A. Ostlie, *An Introduction to Modern Astrophysics* (Cambridge University Press, San Francisco, 2007).
- [28] T. M. Brown et al., *The primeval populations of the ultra-faint dwarf galaxies*, *The Astrophysical Journal Letters* **753**(1), L21 (2012).
- [29] T. M. Brown et al., *The quenching of the ultra-faint dwarf galaxies in the reionization era*, *The Astrophysical Journal* **796**(2), 91 (2014).
- [30] M. S. Bovill e M. Ricotti, *Pre-reionization fossils, ultra-faint dwarfs, and the missing galactic satellite problem*, *The Astrophysical Journal* **693**(2), 1859 (2009).