

# Mapeamentos de galáxias

Bruno Azevedo Lemos Moraes

Universidade Federal do Rio de Janeiro

---

## Resumo

Neste artigo, abordamos o desenvolvimento dos mapeamentos de galáxias e a sua importância para a astrofísica extragaláctica e para a cosmologia. Acompanhando a evolução dos telescópios, instrumentos e técnicas de observação astronômica desde o século XIX, discutimos como os avanços tecnológicos permitiram desvelar propriedades fundamentais do universo, tal como sua dinâmica, composição e sua estrutura em grande escala. Os mapeamentos de galáxias também revelaram a presença de matéria escura em diferentes escalas e seu impacto tanto na topologia da teia cósmica quanto nos processos de formação e evolução das galáxias. Observações das diferentes propriedades das galáxias individuais e suas correlações espaciais induzidas pelo ambiente local fornecem evidências para testar diferentes modelos físicos da interação gravitacional e seu impacto nos processos energéticos que contribuem para moldar os diferentes tipos de galáxias e suas características. Simulações de n-corpos possuem um papel crucial na reprodução da formação e evolução das estruturas cósmicas, permitindo contrastar as observações com universos simulados e testar teorias e hipóteses sobre a dinâmica do universo e a formação de galáxias. Em suma, a análise da estrutura em grande escala e dos efeitos ambientais na formação e evolução das galáxias ilustram a conexão complexa entre a cosmologia e a astrofísica modernas e ressalta a importância dos mapeamentos de galáxias para melhor entendê-las, apontando para o potencial de descobertas futuras à medida que as tecnologias e métodos observacionais continuem a evoluir.

## Abstract

In this article, we discuss the development of galaxy surveys and their importance for extragalactic astrophysics and cosmology. Following the evolution of telescopes, instruments and astronomical observation techniques since the 19th century, we discuss how technological advances have made it possible to unveil fundamental properties of the universe, such as its dynamics, composition and large-scale structure. Galaxy surveys have also revealed the presence of dark matter on different scales and its impact on both the topology of the cosmic web and the processes of galaxy formation and evolution. Observations of the different properties of individual galaxies and their spatial correlations induced by the local environment provide evidence to test different physical models of gravitational interaction and their impact on the energetic processes that contribute to shaping the different types of galaxies and their characteristics. N-body simulations play a crucial role in reproducing the formation and evolution of cosmic structures, allowing us to contrast observations with simulated universes and test theories and hypotheses about the dynamics of the universe and the formation of galaxies. In short, analysing the large-scale structure and environmental effects on the formation and evolution of galaxies illustrates the complex connection between modern cosmology and astrophysics and highlights the importance of mapping galaxies to better understand them, pointing to the potential for future discoveries as technologies and observational methods continue to evolve.

---

**Palavras-chave:** galáxias, astronomia, astrofísica, cosmologia.

**Keywords:** galaxies, astronomy, astrophysics, cosmology.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43769](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43769)

## 1 Introdução

Galáxias são objetos astronômicos complexos. A competição entre a atração gravitacional e os efeitos repulsivos e turbulentos de reações nucleares gera uma grande variedade de fenômenos e estruturas: rotação, formação de braços espirais,

barras em bojos, diferentes cores devido à taxa de formação estelar e à formação de elementos mais pesados, ondas de choque e muitos mais. O estudo da dinâmica e propriedades de galáxias e sua evolução formam vastas áreas de estudo astrofísico, apoiando-se tanto em técnicas e modelos matemáticos quanto em simulações numéricas.

A riqueza fenomenológica não se encerra no estudo de galáxias individuais; a distribuição de galáxias no universo é também bastante sensível à dança entre a física gravitacional e a física nuclear, termodinâmica e física estatística. Adicionalmente, a expansão do universo e seus efeitos na matéria e energia se fazem sentir em grandes escalas de distância e de tempo, trazendo mais uma componente física a influenciar a distribuição de galáxias. A influência combinada destes atores possui ao menos duas grandes consequências: a estrutura em grande escala do universo desenvolve estruturas complexas ao longo da evolução cósmica, semelhante a uma “teia de aranha” tridimensional,<sup>1</sup> e as propriedades locais de regiões específicas nestas estruturas influenciam o tipo, quantidade e propriedades individuais de galáxias que ali estão presentes.

Mapeamentos de galáxias se desenvolveram ao longo do século XX e nas primeiras décadas do século XXI para estudar e melhor entender estas e outras questões. Do ponto de vista da cosmologia, a estrutura em grande escala do universo contém informações valiosas sobre as propriedades globais do universo. O processo de formação desta estrutura se dá em vastas escalas, bem menos sensíveis a processos energéticos complexos e à interação gravitacional em pequenas escalas. Também se dá em escalas de tempo longas, de forma que a lenta evolução cósmica pode agir e deixar suas marcas de forma aparente na distribuição. Medições das propriedades estatísticas da estrutura em grande escala fornecem vínculos precisos sobre parâmetros cosmológicos e sobre possíveis modificações da força da gravidade em grandes escalas, inacessíveis a experimentos locais. Do ponto de vista da formação e evolução de galáxias, caracterizar cuidadosamente as suas propriedades e as dos ambientes em que vivem permite estabelecer correlações empíricas e utilizá-las como um guia para o desenvolvimento de modelos que descrevam os diferentes processos físicos em jogo.

Embora hoje saibamos muito sobre a cosmologia e a astrofísica extragaláctica, o processo de observação, descoberta e modelagem destes fenômenos foi lento e cheio de obstáculos. A histó-

ria dos mapeamentos de galáxias está entremeada com a história dos percalços e sucessos da astronomia e cosmologia modernas. Desde a criação dos primeiros catálogos de nebulosas no século XIX, novas observações trouxeram novos enigmas que, por sua vez, motivaram o desenvolvimento ou adaptação de instrumentos e técnicas capazes de realizar observações mais precisas. Estas novas observações elucidam alguns dos mistérios e validam teorias, mas também levantam novas questões. O estudo da estrutura em grande escala do universo e da formação e evolução de galáxias com mapeamentos de galáxias exemplifica este desenvolvimento mútuo da ciência e da tecnologia que é característico de muitas áreas da ciência moderna.

O papel dos desenvolvimentos tecnológicos nos mapeamentos de galáxias não se resume ao desenvolvimento de novos instrumentos e técnicas observacionais; simulações computacionais do processo de formação de estruturas assumiram um papel cada vez mais central na compreensão e na análise dos dados obtidos com mapeamentos de galáxias a partir da segunda metade do século XX. Estas simulações cosmológicas, em sua forma mais simples, descrevem a evolução conjunta de um enorme número de “partículas” evoluindo conjuntamente sob a ação da força da gravidade gerada pelas mesmas. Até o início da década de 80, embora com pouco poder de cálculo e métodos numéricos mais rudimentares, já era possível demonstrar a importância de colisões de galáxias em seus processos evolutivos e investigar o impacto de modelos cosmológicos na estrutura em grande escala do universo, dentre outros resultados. De lá para cá, as simulações cosmológicas evoluíram drasticamente, assumindo um papel indispensável na interpretação e análise dos mapeamentos de galáxias modernos.

Nas últimas décadas, mapeamentos de galáxias se tornaram uma empreitada de complexidade e tamanho comparável aos grandes aceleradores de partículas. Parte desta evolução foi causada pela descoberta da aceleração do universo, talvez gerada por uma hipotética energia escura. Junto com a questão da natureza da matéria escura, a cosmologia e a astrofísica extragaláctica se tornaram grandes “laboratórios naturais” para investigar possíveis componentes fundamentais do universo em escalas e regimes de energia dificilmente

<sup>1</sup>Por esta razão, uma outra nomenclatura bastante usada para a distribuição de matéria e galáxias no universo é “teia cósmica”.

acessíveis em experimentos terrestres. Os principais mapeamentos do século XXI envolvem de centenas a milhares de cientistas, em muitos casos construindo novos telescópios e satélites dedicados exclusivamente a um grande projeto. Entretanto, as questões gerais que os mapeamentos de galáxias permitem abordar continuam semelhantes: quais são as propriedades da estrutura em grande escala do universo e o que elas nos dizem sobre sua natureza fundamental? Como se formam e evoluem as galáxias que observamos nestas escalas e como são afetadas pela evolução e estrutura cósmica?

O objetivo deste artigo é contar a história dos mapeamentos de galáxias, explorando em paralelo as questões científicas que motivaram seu desenvolvimento e o que podemos aprender sobre as maiores escalas do universo e sobre as galáxias que ali existem. Ele não pretende ser uma historiografia rigorosa do tema e nem um artigo de revisão especializado das áreas de cosmologia ou astrofísica extragaláctica; sua ambição é contextualizar as grandes questões científicas das áreas de cosmologia e astrofísica extragaláctica, conforme estas foram sendo desenvolvidas e refinadas, e fornecer uma porta de entrada à literatura mais especializada.

## 2 Primeiros mapeamentos e o surgimento da astrofísica e da cosmologia

Embora a astronomia exista enquanto atividade humana desde o início da história documentada, é no século XX que surgem a astrofísica extragaláctica e a cosmologia moderna. A primeira surge como consequência da aplicação de novas ideias e técnicas da física às observações astronômicas, permitindo caracterizar as nebulosas espirais como objetos externos à Via Láctea, dentre muitos outros avanços. Já a segunda surge como uma das principais aplicações da teoria da relatividade geral formulada por Einstein em 1915, e sua primeira comprovação experimental se dá com a medida da velocidade de recessão de galáxias próximas, demonstrando a expansão cósmica. Esta seção aborda a história e os avanços dos mapeamentos de galáxias do século XIX ao fim da Segunda Guerra Mundial, detalhando desenvolvimentos fundamentais que estabeleceram

as bases para nosso entendimento moderno do universo e das galáxias nele existentes.

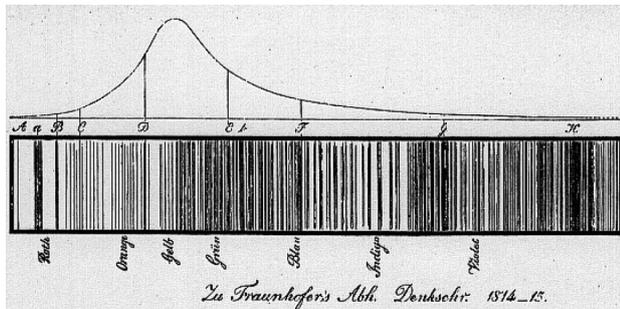
### 2.1 A pré-história dos mapeamentos de galáxias

A história dos mapeamentos de galáxias se inicia, por assim dizer, com a criação dos primeiros catálogos de nebulosas na virada do século XVIII ao XIX. Sob o risco de simplificar a história, pode-se argumentar que os dois principais personagens desta era são o astrônomo francês Charles Messier (1730-1817) e o astrônomo britânico de origem alemã William Herschel (1738-1822). O principal interesse científico do primeiro era a identificação e o estudo de cometas. Messier compilou e publicou em 1784 um catálogo de 103 objetos que poderiam atrapalhar observadores de cometas [2]. Algumas das galáxias mais próximas e conhecidas possuem até hoje, além de seu nome popular, números de identificação advindos deste primeiro catálogo. Por exemplo, a galáxia de Andrômeda, nossa grande vizinha, é também conhecida como M31.

Tendo se interessado por astronomia após uma carreira de músico e compositor, William Herschel (1738-1822) construiu alguns dos telescópios mais avançados para a época e, com eles, foi responsável por inúmeros progressos em astronomia, incluindo a descoberta de Urano, a detecção de radiação infravermelha e a caracterização de aglomerados de estrelas no catálogo Messier. Usando um de seus próprios telescópios, William Herschel e sua irmã Caroline Herschel (1750-1848) realizaram um levantamento sistemático do céu, descobrindo e catalogando milhares de nebulosas. Este trabalho foi iniciado no fim do século XVIII e continuado por Caroline, após a morte do irmão, e pelo filho de William, John Herschel (1792-1871). O catálogo final foi publicado pelos Herschels em 1864 com o nome de *Catálogo Geral de Nebulosas* [3]. Continuando este trabalho, John Dreyer (1852-1926), astrônomo e historiador da astronomia dinamarquês, produziu o *Novo Catálogo Geral de Nebulosas e Aglomerados de Estrelas* e mais catálogos suplementares ao longo dos anos. A versão final, de 1908, contém aproximadamente 15.000 nebulosas brilhantes, e até hoje o *New General Catalogue* — ou NGC, como é conhecido em inglês — é o catálogo mais importante de galáxias



**Figura 1:** Imagens da Galáxia do Redemoinho (*Whirlpool Galaxy*, em inglês) identificada como M51 no catálogo de Messier e como NGC 5194 no *New General Catalogue*. Esta galáxia foi a primeira nebulosa cuja estrutura espiral foi diretamente observada. (a) Ilustração original de Lord Rosse [1], feita à mão e observada com seu telescópio refletor privado de 72 polegadas. (b) Imagem moderna da mesma galáxia e sua companheira, NGC 5195, realizada com o telescópio Hubble. Crédito: NASA, ESA, S. Beckwith (STScI), and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA).



**Figura 2:** Ilustração de Fraunhofer baseada no espectro da luz solar observada com seu espectrógrafo [7]. A curva contínua representa a irradiância da luz solar em função de seu comprimento de onda (i.e. sua cor). As linhas escuras indicam valores do comprimento de onda para os quais a irradiância é suprimida. Estas linhas de absorção se devem à presença de diferentes elementos na atmosfera solar, por onde passa a luz advinda de seu núcleo.

brilhantes [4–6]. A Figura 1 mostra uma das galáxias mais conhecidas, a Galáxia do Redemoinho, presente tanto no catálogo de Messier quanto no NGC.

Desenvolvimentos tecnológicos de outras áreas também foram fundamentais para o progresso das observações astronômicas. Dentre eles, dois se destacam: a invenção da espectroscopia e da fotografia. Joseph Fraunhofer (1787-1826) e Gustav Kirchhoff (1824-1887) foram pioneiros na aplicação de técnicas de difração inventadas no início do século XIX. Com estas técnicas, foi possível caracterizar o espectro luminoso de fontes de radiação e, em experimentos terrestres, identificar as características de diferentes elementos e com-

postos. Em particular, linhas de emissão e absorção, que hoje sabemos serem causadas pelas transições de elétrons entre níveis orbitais, permitem identificar elementos de forma precisa. Ao apontar espectrógrafos para o Sol e outros objetos celestes, Fraunhofer pôde identificar e catalogar uma grande quantidade de linhas de emissão e absorção. A Figura 2 mostra a ilustração original de Fraunhofer correspondendo ao espectro observado do sol, possuindo uma distribuição contínua correspondendo a um corpo negro e linhas de absorção representadas no retângulo inferior [7]. Ao longo das décadas subsequentes a estas primeiras medidas, Léon Foucault (1819-1868), Gustav Kirchhoff (1824-1887) e diversos outros cientistas catalogaram as linhas de emissão e absorção de diferentes fontes de luz. No início dos anos 1860, Kirchhoff publicou uma série de artigos analisando detalhadamente o espectro solar e descrevendo a composição química de sua atmosfera [8–10].

Para mapeamentos de galáxias modernos, uma das principais razões para a importância de se medir espectros de galáxias consiste em permitir uma medida direta do efeito Doppler. Este efeito, proposto pelo físico e matemático austríaco Christian Doppler (1803-1853) em 1842, ocorre quando a fonte de um sinal sonoro ou luminoso se encontra em movimento relativo a um observador [11]. O comprimento de onda do sinal recebido se reduz caso ambos estejam se aproximando e aumenta no caso contrário. No caso de objetos astronômicos, este efeito causa um deslo-

camento do comprimento de onda das linhas de emissão e absorção, permitindo assim uma medida indireta da velocidade do objeto. Esta técnica de medida se mostrou fundamental para a descoberta da expansão do universo em 1929.

O desenvolvimento de técnicas fotográficas foi também fundamental para o avanço da astronomia moderna. Antes da invenção do daguerreótipo e das placas fotográficas, astrônomos desenhavam à mão imagens dos objetos que observavam através dos telescópios. Com o surgimento e avanço de técnicas fotográficas cada vez mais sensíveis, foi possível obter imagens com precisão de detalhes além da capacidade de reprodução humana. Já o desenvolvimento de materiais químicos capazes de registrar a luz com muito mais eficiência fez aumentar consideravelmente a capacidade de observação de objetos invisíveis ao olho nu e mesmo aos telescópios mais potentes.<sup>2</sup>

Estes desenvolvimentos, culminando no fim do século XIX, montaram a cena para as grandes descobertas da astrofísica e cosmologia na primeira metade do século XX e para o surgimento dos primeiros mapeamentos de galáxias modernos.

## 2.2 A natureza das nebulosas e a medida de distâncias com estrelas Cefeidas

Na virada do século XIX para o século XX, a astronomia passou por uma revolução. Nos Estados Unidos, em particular, entrou-se na era dos grandes telescópios e observatórios controlados por universidades e financiados por doações de milionários industriais americanos. Novos instrumentos localizados nos recém-criados Observatório Lick (1888), Observatório Yerkes (1897), Observatório Monte Wilson (1904) e Observatório Lowell (1894)—e no mais antigo Observatório de Harvard College (1839)—foram responsáveis por grande parte das novas e cruciais descobertas da astronomia até 1949, quando o telescópio revolucionário de 200 polegadas do Observatório Palomar (1928) iniciou seu funcionamento. Antes do século XX, acreditava-se que a maior parte dos objetos celestes observados era parte da nossa galáxia. Ao chegarmos à metade do século, a expan-

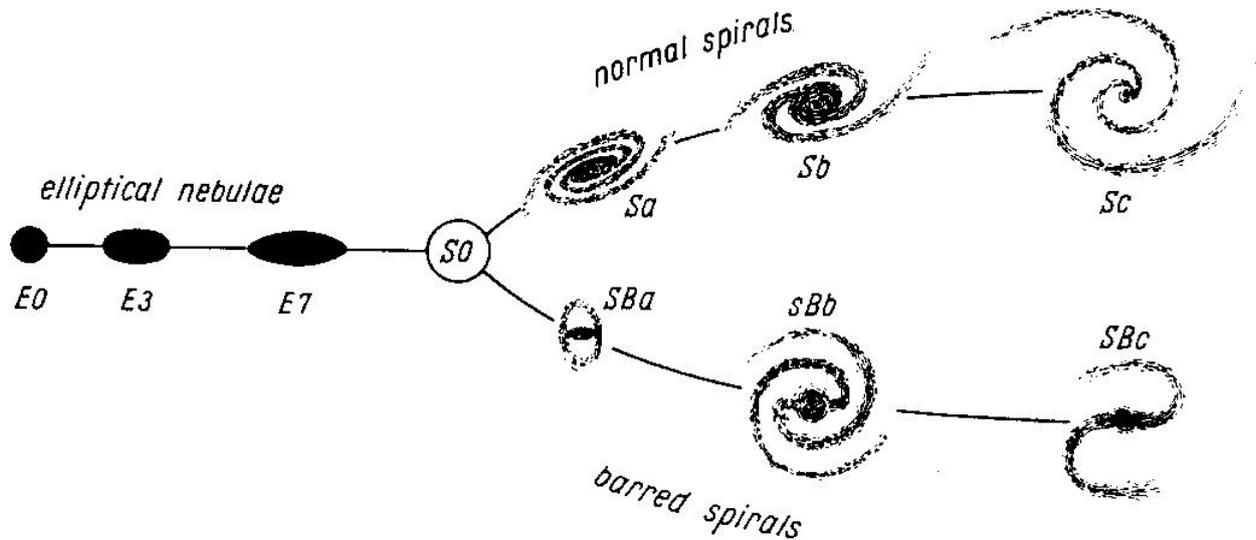
<sup>2</sup>Foi também de extrema importância a invenção de novos mecanismos de movimentação dos telescópios para permitir o acompanhamento da rotação do céu e manter o telescópio apontado para um objeto específico [12].

são do universo e a natureza extragaláctica das nebulosas espirais eram fatos amplamente aceitos e verificados observacionalmente, e os primeiros mapeamentos modernos de galáxias começavam a ser realizados.

O primeiro passo nessa trajetória consistiu na identificação da natureza extragaláctica das nebulosas, em particular as espirais. Nas duas primeiras décadas do século XX, os novos observatórios foram utilizados para mapear a distribuição de estrelas na galáxia—tentando assim determinar a sua estrutura—e para desvendar o mistério da natureza das nebulosas espirais, em particular o fato de que são uma classe de objetos que não se localiza no plano da galáxia. Em paralelo com o nascimento da astrofísica estelar, novos espectrógrafos, placas fotográficas e grandes telescópios foram combinados para identificar maneiras indiretas de medir distâncias absolutas a objetos distantes para os quais o efeito de paralaxe não pode ser usado.<sup>3</sup> A teia de observações e evidências rapidamente se tornou complexa. Um debate entre William Shapley (1885-1972) e Heber Curtis (1872-1942), hoje conhecido como Debate Shapley-Curtis, buscou dar sentido às evidências existentes sobre o tamanho e a estrutura da Via Láctea e sobre a natureza das nebulosas espirais, sem chegar a um claro consenso.

Foram necessárias as observações de Edwin Hubble (1889-1953), em 1925, para decidir conclusivamente o debate. Hubble utilizou a técnica de medida de distância usando uma relação entre o período e a luminosidade de Cefeidas, estrelas variáveis presentes na Via Láctea e em galáxias próximas. Esta relação foi medida por Henrietta Leavitt (1868-1921), trabalhando como chefe do departamento de fotometria estelar fotográfica do Harvard College Observatory. Usando dados observados pela estação de observação de Arequipa, no Peru, Leavitt calibrou a relação período-luminosidade de Cefeidas próximas encontradas na Pequena Nuvem de Magalhães [13]. A medida do período de flutuação fornece assim uma medida indireta da sua luminosidade intrínseca, e a comparação desta última com

<sup>3</sup>Paralaxe estelar é a mudança aparente da posição de uma estrela no céu conforme a Terra orbita de um lado ao outro do Sol. Como conhecemos a distância da Terra ao Sol, é possível usar trigonometria básica para medir as distâncias até as estrelas próximas.



**Figura 3:** O diapasão de Hubble em sua versão original. As galáxias elípticas se encontram à esquerda. Os braços do diapasão se dividem em espirais normais e espirais barradas, com as diferentes letras se referindo às diferentes morfologias dos braços espirais.

a luminosidade aparente permite medir a distância à estrela.

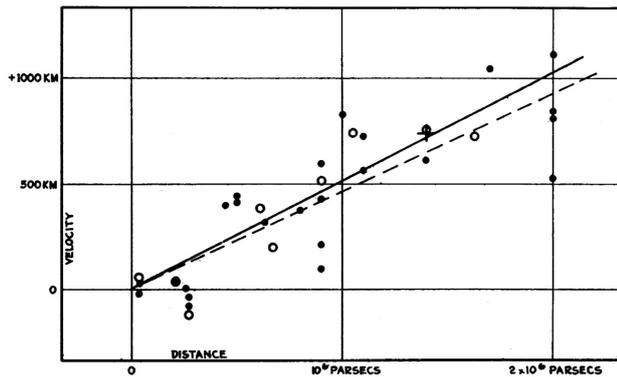
Uma das nebulosas espirais mais proeminentes no céu é a nebulosa de Andrômeda. Um ponto controverso no debate sobre a natureza das nebulosas envolvia o valor da distância de Andrômeda ao Sistema Solar. Esta distância foi medida de várias formas nas primeiras décadas do século XX. Porém, devido a múltiplas discrepâncias, não havia consenso sobre este valor. A importância fundamental do trabalho de Hubble foi utilizar o telescópio Hooker de 100 polegadas do Observatório Monte Wilson para observar 12 Cefeidas em Andrômeda e 22 na galáxia do Triângulo (M33), um pouco mais distante. Hubble pode assim demonstrar conclusivamente que estas galáxias estavam a distâncias muito maiores do que o tamanho estimado da Via Láctea [14].

### 2.3 Classificação de galáxias, redshifts e a expansão do universo

Estes primeiros grandes resultados de Hubble não foram os únicos de importância fundamental produzidos por ele na década de 1920. Simultaneamente à publicação das distâncias das galáxias espirais, Hubble introduziu o seu sistema de classificação de galáxias em elípticas, lenticulares, espirais normais, espirais barradas e irregulares. Este sistema foi apelidado de diapasão de Hubble [15]. A Figura 3 mostra a primeira versão

do diapasão, publicada em seu famoso livro *O Reino das Nebulosas* [16]. Hubble interpretou as galáxias em seu sistema como estágios evolutivos percorridos pelas mesmas; embora esta interpretação tenha se mostrado errônea, o diapasão de Hubble mantém sua importância até hoje. Isto se deve ao fato de que a classificação proposta está correlacionada com uma série de características físicas das galáxias, tais como cor, taxa de formação estelar, idade, metalicidade, de forma que a tipificação morfológica de uma galáxia traz informações indiretas sobre os processos astrofísicos presentes nela. Pode-se argumentar que este é o ponto de partida da astrofísica extragaláctica.

Hubble realizou descobertas igualmente revolucionárias no campo da cosmologia. Para tanto, ele combinou as medidas de distâncias a galáxias próximas obtidas com Cefeidas e as medidas do efeito Doppler gerado pelas velocidades relativas destes objetos. Estas últimas haviam sido realizadas por Vesto Slipher (1875–1969) na década de 1910. Slipher, trabalhando com um novo espectrógrafo instalado no telescópio de 24 polegadas do Observatório Lowell, publicou em 1917 medidas espectroscópicas pioneiras de 25 nebulosas espirais [17]. Além de caracterizar a composição química destes objetos, as medidas revelaram que estas nebulosas possuíam grandes velocidades, muito maiores do que a de qualquer objeto já observado na Via Láctea. Mais importante,



**Figura 4:** Primeira medida da lei de Hubble, mostrando a relação linear entre distância (em *parsecs*) e a velocidade de recessão de galáxias próximas. Pontos preenchidos e abertos representam diferentes métodos de análise e as retas preenchidas e tracejadas indicam o melhor ajuste estatístico em cada um dos casos.

grande parte destas galáxias possuía um desvio das linhas de absorção do espectro para comprimentos de onda maiores. Este efeito foi chamado de *redshift* (desvio para o vermelho, em inglês), o que indica que estão se afastando de nós.

Hubble baseou-se majoritariamente nestas medidas espectroscópicas e utilizou uma variedade de métodos, incluindo suas medidas de distância com Cefeidas, para demonstrar uma relação linear entre a distância e a velocidade de recessão das galáxias [18], como mostrado na Figura 4. Este efeito é previsto pelos modelos cosmológicos homogêneos e isotrópicos baseados na Relatividade Geral; as medidas de Hubble—tanto no artigo original quanto em um trabalho subsequente com Milton Humason (1891-1972) [19]—forneceram uma confirmação estrondosa destes modelos. Esta relação linear é até hoje conhecida como Lei de Hubble, e forneceu a base para o desenvolvimento do modelo cosmológico padrão.

Hubble continuou refinando suas observações e investigando as propriedades das galáxias e sua distribuição no universo. Dentre os resultados mais importantes (e talvez menos conhecidos), ele percebeu que poderia usar a distribuição de galáxias para testar a hipótese de homogeneidade e isotropia na qual o modelo cosmológico padrão se baseia. A suposição de que as galáxias estão distribuídas de maneira estatisticamente homogênea e isotrópica implica em uma relação entre a sua magnitude aparente e seus *redshifts*. Até os limites de luminosidade mais fracos que conseguiu atingir, Hubble não detectou nenhum desvio

da homogeneidade e isotropia aproximados, realizando assim um dos primeiros mapeamentos de galáxias e obtendo uma das primeiras verificações observacionais das hipóteses básicas do modelo cosmológico [16].

Em seus últimos anos de vida, Hubble planejou publicar um grande atlas ilustrando os diferentes tipos e características de galáxias. Embora não tenha conseguido completar esta empreitada, seu último assistente e também grande astrônomo, Allan Sandage (1926–2010), processou os dados já recolhidos e publicou o *Hubble Atlas of Galaxies* [20]. Em paralelo à criação do Atlas de Galáxias de Hubble, Gérard de Vaucouleurs (1918–1995), Halton Arp (1927–2013) e outros astrônomos publicaram uma série de catálogos e atlas de galáxias cujo objetivo era caracterizar de forma minuciosa os diferentes tipos de galáxias, suas cores, morfologias, propriedades espectroscópicas e tipologia. Simulações detalhadas das interações entre duas galáxias permitiram reproduzir uma variedade de morfologias exóticas de galáxias irregulares, iniciando assim um processo de comparação de previsões teóricas e simulações com a variada fenomenologia observada nos mapeamentos de galáxias da época [21].

### 3 Avanços do pós-guerra

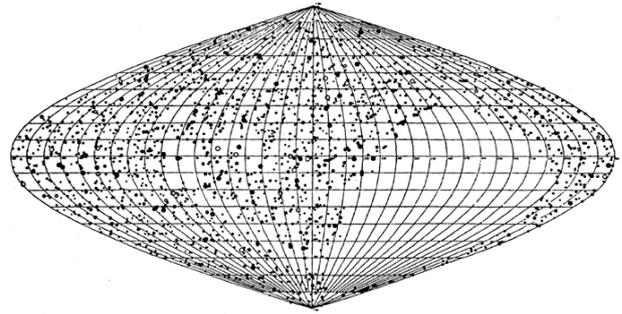
Após o fim da Segunda Guerra Mundial, a astrofísica e a cosmologia passaram por uma transformação radical. O advento da radioastronomia gerou vários avanços, permitindo realizar pela primeira vez grandes mapeamentos de fontes de rádio, medir a radiação cósmica de fundo e obter evidências sobre a existência de matéria escura a partir de curvas de rotação de galáxias espirais próximas. Em paralelo, avanços tecnológicos e computacionais revolucionaram o design de telescópios ópticos, coleta de dados, análise e modelagem teórica, permitindo comparações precisas entre teoria e observação. Alguns grandes mapeamentos de galáxias foram realizados, e a aplicação de técnicas estatísticas para a caracterização da distribuição de galáxias nas maiores escalas inaugurou um novo paradigma na cosmologia. De um ponto de vista astrofísico, as observações, combinadas a simulações numéricas, permitiram investigar os diferentes processos influenciando a

formação e evolução de galáxias, incluindo a descoberta de halos de matéria escura envolvendo as galáxias. Adicionalmente, simulações cosmológicas demonstraram a necessidade de matéria escura fria para explicar a estrutura em grande escala observada. Ao fim da década de 1980, a compreensão moderna da estrutura em grande escala do universo se estabeleceu firmemente, assim como os mecanismos básicos responsáveis pelos processos de formação e evolução de galáxias. Nesta seção, exploraremos estes diferentes desenvolvimentos.

### 3.1 Levantamentos de rádio

As primeiras observações astronômicas na faixa do rádio—motivadas parcialmente pela busca de fontes de interferência na transmissão de emissões em rádio popularizadas nas décadas de 1920 e 1930—foram realizadas por Karl Jansky (1905-1950) e Grote Reber (1911-2002). Estas observações permitiram identificar a Via Láctea como uma fonte de emissão de rádio, de mecanismo físico ainda desconhecido [22, 23]. Com o desenvolvimento e uso de radares em aplicações militares, um grande esforço de guerra buscou refinar técnicas para identificar fontes de ruído e degradação do sinal. O fim da Segunda Guerra Mundial trouxe estes avanços para as aplicações civis, revolucionando a radioastronomia. Enquanto até então os levantamentos de galáxia se davam essencialmente com observações de telescópios ópticos, o pós-Guerra se caracterizou como uma época de abertura do espectro eletromagnético. No caso particular da faixa do rádio, inúmeros avanços científicos foram obtidos, tais como a descoberta de quasares e pulsares, a medida de curvas de rotação de galáxias com a emissão do hidrogênio neutro e a primeira medida da radiação cósmica de fundo prevista pelos modelos térmicos do universo primordial [12].

No contexto específico de mapeamentos de galáxias, as observações de rádio tiveram um papel importante na contestação dos modelos cosmológicos de estado estacionário propostos na década de 50 e 60 [24]. Levantamentos de galáxias com radiotelescópios, liderados por Martin Ryle (1918-1984) em Cambridge, na Inglaterra e Bernard Mills (1920-) em Sydney, na Austrália, realizaram medidas da contagem de galáxias



**Figura 5:** Fontes identificadas no *Second Cambridge Catalog of Radio Sources* [25]. O catálogo contém quase duas mil fontes de emissão na faixa de rádio de 82 MHz. A maioria das fontes é extragaláctica, mas há detecções espúrias e alguns objetos locais, o que gerou erros sistemáticos nos resultados originais obtidos com este catálogo. Estes erros foram corrigidos em edições subsequentes do catálogo de Cambridge.

em função de seu fluxo observado e obtiveram resultados discrepantes para esta dependência. A Figura 5 mostra um dos catálogos de fontes de rádio—including tanto galáxias quanto fontes contaminantes—gerado por Ryle e seus colaboradores [25]. Após alguns anos de controvérsia e refinamento das técnicas observacionais, chegou-se à conclusão que estas contagens não eram compatíveis com o modelo cosmológico do estado estacionário. Em 1965, poucos anos após estas medidas, a primeira observação da radiação cósmica de fundo por Penzias e Wilson [26], também usando um radiotelescópio, deu suporte ao modelo do Big Bang, enterrando definitivamente o modelo do estado estacionário. O excesso de galáxias em baixas luminosidades e suas possíveis causas continua sendo um tema de pesquisa ativo, envolvendo a possível evolução nas populações de fontes e em suas propriedades astrofísicas [27]. A questão da homogeneidade e isotropia estatísticas em grande escala do universo continua sendo analisada até hoje, sem nenhuma evidência que conteste esta hipótese [28].

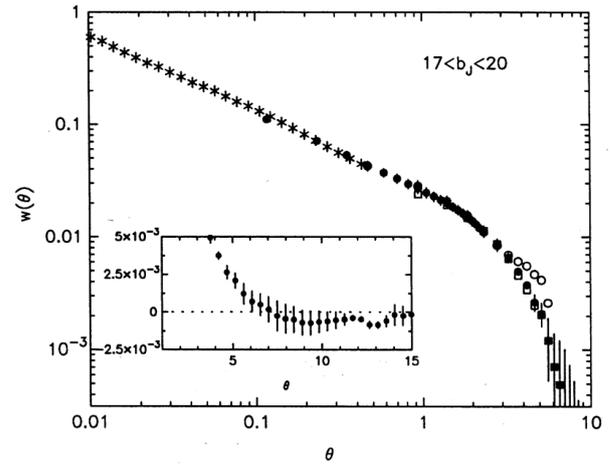
### 3.2 Estatística da distribuição de galáxias com levantamentos ópticos

Enquanto os primeiros levantamentos de rádio forneciam suporte adicional à homogeneidade e isotropia aproximada da distribuição de galáxias no universo, levantamentos na faixa do óptico conduziam um novo programa de observações ambiciosas. Dentre os novos levantamentos, o

Lick Northern Proper Motion Surveys, realizado no Observatório Lick, foi o mais importante. Seu objetivo primário era medir os movimentos de estrelas próximas, mas Donald Shane (1895-1983) e Carl Wirtanen (1910-1990) realizaram um programa ambicioso para catalogar mais de um milhão de galáxias brilhantes em todo o céu visível do hemisfério norte [29]. A partir deste catálogo, cientistas pioneiros—Jerzy Neyman e Elisabeth Scott [30–32], Limber [33, 34], Rubin [35]—iniciaram um programa de medição das correlações estatísticas espaciais na distribuição de galáxias em grande escala.

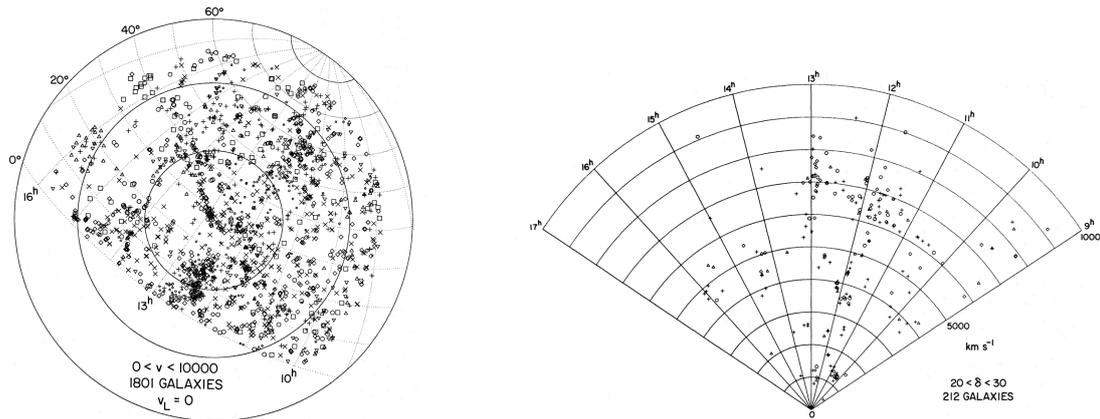
Para entender a lógica por trás desta abordagem, é necessário ter em mente que o processo de geração da estrutura em grande escala do universo possui natureza intrinsecamente aleatória. Isto se deve tanto às perturbações iniciais no universo—geradas por flutuações quânticas—quanto ao crescimento aleatório destas perturbações e consequente formação de galáxias. Não é possível construir um modelo determinístico para a posição de cada galáxia individual no universo. Podemos, porém, interpretar a homogeneidade e isotropia do universo como propriedades estatísticas e definir a função de correlação de galáxias como a função que fornece a probabilidade conjunta de que duas galáxias quaisquer estejam a uma separação  $r$  uma da outra. Esta é uma das possíveis funções estatísticas, dentre outras, que podemos definir para obter informações sobre os desvios da distribuição de galáxias no universo de um processo puramente aleatório sobre um fundo homogêneo e isotrópico [36].

Ao longo da década de 60 e 70, o estudo estatístico da distribuição em grande escala de galáxias e o desenvolvimento de modelos teóricos para o crescimento de estruturas no universo (i.e. perturbações cosmológicas) caminharam lado a lado. Do ponto de vista teórico, grupos liderados por Jim Peebles (1935-) e Yakov Zel'dovich (1914-1987) desenvolveram pela primeira vez modelos para as anisotropias na radiação cósmica de fundo e para o crescimento das perturbações fracionárias na densidade de matéria [12, 40]. Do ponto de vista observacional, buscou-se principalmente caracterizar o comportamento da função de correlação de galáxias: há alguma escala preferencial que demonstra mais aglomeração? Há alguma forma matemática relativamente simples



**Figura 6:** Análise estatística do mapa de galáxias observado pelo UK Schmidt Telescope, localizado no Observatório Siding Spring, na Austrália. Suas placas fotográficas foram escaneadas pelo sistema SERC Automated Plate Measuring da Universidade de Cambridge. O mapa do céu mostra a distribuição projetada de galáxias em uma grande área do hemisfério sul celeste. A medida da função de correlação angular  $w(\theta)$  mostra que, para ângulos de separação pequenos ( $\theta \in [0.01, 1]$ ), a correlação estatística de galáxias segue uma lei de potência [37].

para este observável? Descobriu-se que, em escalas relativamente pequenas, a função de correlação segue uma lei de potência. Isto indica que a aglomeração ocorre nas mais variadas escalas, desde pequenos grupos de galáxias até grandes aglomerados de galáxias. Em outras palavras, dada a posição de uma galáxia, há uma tendência maior de que haja outras próximas. O mesmo vale para aglomerados de galáxias. Estas conclusões se mantêm estáveis para diferentes amostras de brilho aparente mais forte ou mais fraco, o que indica que a tendência à aglomeração é estável no universo próximo de nós [37]. A Figura 6 mostra uma análise dos anos 1990 revisitando os resultados inicialmente obtidos nas décadas de 1950 a 1980. Embora a ausência de espectros impedisse a medida das posições tridimensionais de galáxias no universo, a distribuição projetada na esfera celeste pode ser comparada com a expectativa gerada por uma distribuição estatística cuja correlação espacial não varia com a distância à nossa galáxia. Uma série de análises, em particular de Peebles e colaboradores, refinaram a medida de diversas propriedades estatísticas dos mapeamentos de galáxia da época. Uma das principais fontes para se aprofundar neste sub-tópico



**Figura 7:** Distribuição de galáxias medidas pelo CfA/Harvard Redshift Survey [38, 39] (a) Distribuição de todas as galáxias com medidas de *redshifts* espectroscópicos localizadas no hemisfério norte celeste. (b) Projeção de uma fatia de latitudes  $20^\circ < \delta < 30^\circ$  em coordenadas de ascensão reta (i.e. longitude) e de velocidade de recessão (i.e. *redshift*).

é o livro escrito por Peebles ao fim da década, *The Large Scale Structure of the Universe* [41].

Os resultados descritos acima baseiam-se na análise da distribuição projetada de galáxias diretamente das placas fotográficas. A revolução digital da década de 70 propiciou a realização de levantamentos de galáxias tridimensionais, em que medidas espectroscópicas fornecem a distância radial das galáxias por meio de seus *redshifts*. Para que fosse possível medir espectros de centenas ou milhares de galáxias de brilho fraco e analisá-los de forma robusta, foi necessário o desenvolvimento de detectores digitais acoplados aos espectrógrafos existentes, software especializado para as análises de dados digitais e o uso de grande parte das horas de observação em telescópios modernos. No Observatório de Tartu, na Estônia, Jaan Einasto (1929-) e colaboradores foram os primeiros a medir correlações estatísticas em escalas maiores do que as de aglomerados de galáxias [42]. Quase concomitantemente, Marc Davis (1947-) iniciou em Harvard um projeto para realizar o maior mapeamento espectroscópico de galáxias já existente. Sua ideia foi usar o telescópio do Monte Hopkins, Arizona, de propriedade do Centro de Astrofísica da Universidade de Harvard (CfA/Harvard). Com amplo suporte financeiro do CfA, Davis e seus colaboradores desenvolveram a instrumentação e os códigos necessários para realizar um mapeamento de aproximadamente 2400 galáxias, número até então sem precedentes. O *CfA Redshift Survey* criou pela primeira vez um mapa da estrutura filamentar em grande escala do universo, como

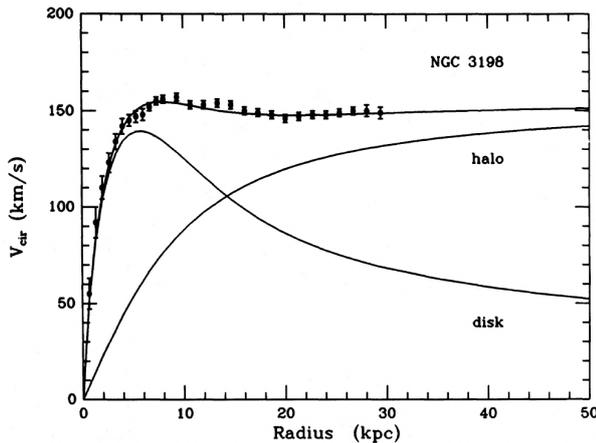
mostrado na Figura 7 [38, 39]. Além de revelar de maneira clara a chamada teia cósmica, o CfA foi fundamental para mostrar que as simulações cosmológicas da época, ainda incipientes, não eram compatíveis com as observações. Para resolver este enigma, Davis e um grupo de jovens especialistas em simulações se juntaram em Berkeley e desenvolveram as primeiras grandes simulações cosmológicas, tema que discutiremos em mais detalhes na próxima seção.<sup>4</sup>

### 3.3 Matéria escura

Voltando um pouco no tempo, os primeiros indícios da existência de algum tipo de matéria escura astrofísica foram identificados já na década de 1930 por Fritz Zwicky. Trabalhando com dados de aglomerados de galáxias do telescópio Palomar, Zwicky usou o efeito Doppler nas medidas espectroscópicas de galáxias para medir a dispersão de velocidades nestes aglomerados. Modelando esta quantidade em termos do teorema do virial (i.e. conservação de energia cinética e potencial), Zwicky percebeu que, para obter as velocidades observadas, era necessário que muito mais matéria além da visível estivesse presente naquela região [43].

Com o surgimento de novos grandes mapeamentos de galáxias, as observações permitiram criar alguns dos primeiros catálogos de grupos e aglomerados de galáxias, tal como o célebre catálogo Abell. A primeira versão deste catálogo

<sup>4</sup>Um [artigo biográfico de Marc Davis](#) contém um relato detalhado da história destes desenvolvimentos.



**Figura 8:** Curva de rotação da galáxia NGC 3196 obtidas a partir da emissão de hidrogênio neutro HI na faixa do rádio. O ajuste inclui a contribuição devido ao halo de matéria escura (“halo”) e à componente estelar visível na faixa do óptico (“disk”) [45].

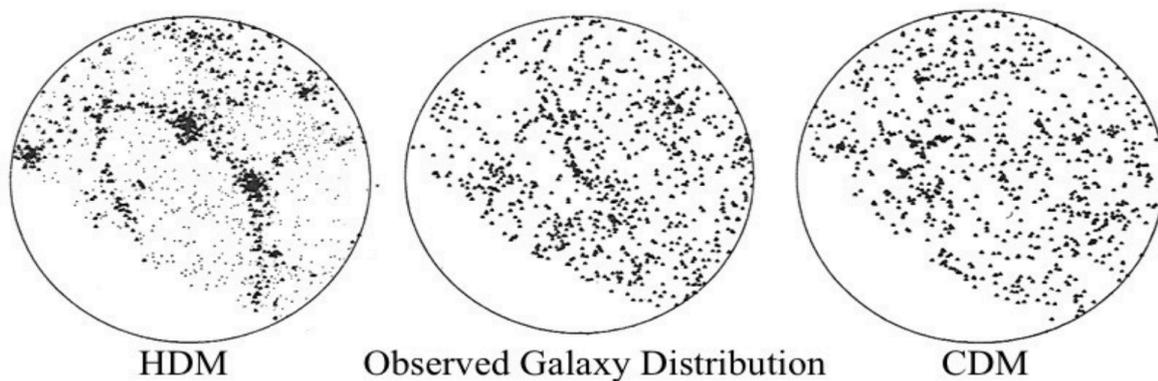
foi compilada por George O. Abell para sua tese de doutorado em 1957, a partir de dados do National Geographic Survey - Palomar Observatory Sky Survey (POSS). Dentre os resultados obtidos na tese e publicados em forma de artigo no ano seguinte [44], mostrou-se que aglomerados de galáxias não se distribuem de forma puramente aleatória no céu, uma das primeiras evidências de estrutura em escalas da ordem de dezenas de Mpc. O catálogo de Abell é um dos principais precursores dos estudos na área de aglomerados de galáxias, que hoje entendemos como objetos coesos formados por um halo de matéria escura preenchido por gás difuso e semeado por dezenas ou até centenas de galáxias.

Porém, embora o conceito de matéria escura tenha sido introduzido no estudo de aglomerados de galáxias, as evidências que convenceram a comunidade da existência de matéria escura vieram da análise das curvas de rotação de galáxias espirais. Estas curvas descrevem o valor da velocidade de rotação do gás e estrelas em função da distância ao centro da galáxia. Supondo-se que toda a matéria presente na galáxia seja visível, espera-se que a curva de rotação atinja um valor de velocidade máxima e, em seguida, decaia continuamente conforme nos afastamos de seu centro [47, cf. seção 2.3(g)]. Medidas destas curvas já vinham sendo realizadas desde o início do século para caracterizar a cinemática das galáxias espirais; a possível existência de grandes densida-

des de matéria não-luminosa era especulada, embora diversos outros possíveis efeitos observacionais confundissem as interpretações [12]. Avanços na capacidade de radiotelescópios e o desenvolvimento de novos instrumentos permitiram realizar observações da emissão de hidrogênio neutro (HI) e caracterizar de forma detalhada as curvas de rotação de galáxias próximas [48, 49]. Estas observações mostraram que a curva de rotação se mantém aproximadamente constante a partir do ponto em que atinge o seu máximo, estendendo-se até grandes distâncias do centro da galáxia. Embora haja outras possíveis explicações para este tipo de curva, uma hipótese é a de que exista uma grande quantidade de matéria escura distribuída em um grande halo em torno da parte visível da galáxia [50, 51]. Esta ideia foi sustentada de maneira convincente por diversas novas medidas, sobretudo a realizada por Vera Rubin, Robert Ford e Norberd Thonnard em 1980 [52]. A Figura 8 mostra uma medida precisa realizada por van Albada, Bahcall e colaboradores em 1985, mostrando claramente a contribuição do halo de matéria escura ao perfil de velocidades tangenciais [45].

Em paralelo a estes desenvolvimentos, estudos cosmológicos avançavam cada vez mais na descrição teórica de flutuações de matéria e energia em torno do fundo cosmológico homogêneo e isotrópico [12, 40]. Estes estudos demonstraram que, caso toda a densidade de matéria esperada para o universo estivesse em forma bariônica, as flutuações cosmológicas deveriam deixar uma assinatura na radiação cósmica de fundo que ainda não havia sido detectada. Ao fim da década de 70, múltiplas observações de diferentes fenômenos em diferentes regimes pareciam indicar a existência de matéria escura, embora não houvesse candidatos astrofísicos capazes de dar conta de toda a fenomenologia existente.

Neste contexto, simulações cosmológicas da estrutura em grande escala do universo contribuíram decisivamente a fazer pender a balança para o lado da existência de matéria escura. Com o aumento do poder de cálculo dos computadores da época, tornou-se possível realizar simulações da interação gravitacional entre partículas de matéria (conhecidas como simulações de N-corpos) em número cada vez maior, incluindo também os efeitos da expansão do fundo cosmológico. Os pri-



**Figura 9:** Comparação de simulações da distribuição de galáxias no universo próximo com observações. Modelos de matéria escura quente (HDM, esquerda) e de matéria escura fria (CDM, direita) são comparadas com dados do CfA/Harvard Redshift Survey (centro, comparar com a Figura 7). As simulações mostram de forma clara que a matéria escura fria é necessária para descrever corretamente a estrutura em grande escala do universo [46].

meios resultados, obtidos na virada da década de 1970 para 1980, não reproduziam a estrutura filamentar sendo observada com cada vez mais detalhes na mesma época [53]. Medidas da massa de neutrinos da ordem de 30 eV [54] (erradas, como se soube depois!) motivaram a hipótese de que a estrutura em grande escala seria permeada por uma grande quantidade de matéria escura quente na forma de neutrinos, onde a palavra quente se refere ao fato de que neutrinos possuem velocidades relativísticas durante grande parte da história do universo. Simultaneamente, novas teorias na área da física de partículas, em particular o desenvolvimento de modelos supersimétricos e a proposta de novas partículas tais como o *axion* e o *photino*, trouxeram a ideia de que uma destas partículas poderia compor uma forma de matéria escura fria (CDM, de *cold dark matter*) [55]. Com avanços no poder de cálculo dos computadores da época e o desenvolvimento de novas ideias e algoritmos para os códigos numéricos, foi possível produzir uma variedade de simulações com diferentes parâmetros cosmológicos e modelos para as propriedades de uma hipotética matéria escura. Marc Davis, instigador e líder do CfA Galaxy Survey, havia obtido uma posição permanente na Universidade de Berkeley. Davis e um grupo de colaboradores que ficou conhecido como *gang of four* (a gangue dos quatro) mostraram inicialmente que as observações não eram compatíveis com a existência de matéria escura quente [56]. Em um artigo subsequente [57], o grupo mostrou que simulações incluindo matéria

escura fria—mediante algumas hipóteses adicionais sobre a relação entre a distribuição de galáxias e de halos de matéria escura—reproduziam acuradamente grande parte das propriedades observadas da estrutura em grande escala. A Figura 9 mostra uma comparação entre simulações com matéria escura fria ou quente e as observações, demonstrando claramente a preferência pela primeira. No espaço de alguns anos, o grupo continuou produzindo novas simulações e resultados, refinando nossa compreensão do papel da matéria escura na formação da estrutura em grande escala do universo.

O conjunto de observações astrofísicas, mapeamentos de galáxias, simulações cosmológicas e novos conceitos advindos da física de partículas convergiram ao longo da década de 1970 e 1980 para criar um novo paradigma em que a matéria escura se torna uma componente fundamental do universo e um tipo de matéria cujas propriedades buscamos desde então desvendar por meio dos mais variados tipos de experimentos, observações e modelos. Neste processo, os mapeamentos de galáxias foram de importância fundamental.

Para uma história mais completa do desenvolvimento das observações e do conceito de matéria escura, indicamos ao leitor relatos especializados [12, 40, 58, 59].

### 3.4 Processos astrofísicos e correlações estatísticas

Além de atacar questões sobre as propriedades fundamentais do universo e a natureza da matéria nele existente, mapeamentos de galáxias também permitem investigar questões sobre a natureza das galáxias e sua relação com a estrutura em grande escala do universo, tais como: qual é a distribuição estatística das propriedades das galáxias? Como os diferentes ambientes locais podem influenciar as propriedades das galáxias que ali se formam e evoluem? Dentre os mecanismos físicos que geram correlações, quais se devem à física interna à cada galáxia ou aos efeitos dos ambientes locais na formação e evolução das mesmas?

Uma das primeiras questões envolve a variedade morfológica e de cor descrita no diapasão de Hubble. A primeira hipótese na sua construção é que estas galáxias representavam diferentes estágios de uma única evolução unificada. O acúmulo de observações na segunda metade do século XX descartou esta interpretação simplificada. Dentre as evidências em favor de modelos mais complexos, as primeiras simulações numéricas de colisões de galáxias, geradas pelos irmãos Alar (1937-) e Juri Toomre (1940-) mostraram que morfologias irregulares das mais variadas podem resultar destas colisões [21]. Outro tipo de processo, ligado à presença de gás em aglomerados de galáxias, é conhecido pelo nome de *ram pressure stripping* [60]. Neste processo, o gás intra-aglomerado expulsa gás de dentro de galáxias espirais que estejam em movimento dentro do aglomerado, favorecendo a criação de galáxias lenticulares, encontradas com muito mais frequência em aglomerados de galáxias [61,62]. Ambos os processos, além de alterar a morfologia das galáxias, causam um grande aumento na taxa de formação estelar, um dos fenômenos mais importantes na evolução das galáxias. Estes resultados, dentre outros, enfatizaram a importância da compreensão do efeito do ambiente—na forma de halos de matéria escura de diferentes massas—e das interações entre galáxias nos processos de formação e evolução destes objetos.

Questões sobre a distribuição de luminosidades de galáxias também surgem com a realização de mapeamentos cada vez maiores. A luminosidade de uma galáxia—em uma dada faixa do

espectro—é uma de suas propriedades mais evidentes. Há uma enorme faixa de luminosidades absolutas observadas nas galáxias em nosso universo. Uma pergunta imediata é: qual é a distribuição estatística destas luminosidades? Em termos mais corriqueiros: há mais galáxias muito brilhantes ou menos brilhantes? Ou há uma quantidade igual delas? E como a luminosidade de uma galáxia se correlaciona com outras propriedades, tais como seu tipo, sua taxa de formação estelar, seu tamanho, etc? Para responder a este tipo de pergunta, podemos introduzir o conceito de função de luminosidade. Esta função descreve, grosso modo, a quantidade de galáxias por faixa de luminosidade num dado volume finito do universo. Uma função que cresce com a luminosidade, por exemplo, indica que há mais galáxias muito luminosas do que galáxias pouco luminosas. A função de luminosidade pode, em princípio, depender do tipo de galáxia que se está observando, do tipo de ambiente em que se encontra um dado volume e da idade do universo na época.

Na década de 70, um importante trabalho de Paul Schechter (1948-) propôs uma forma universal para a função de luminosidade [63]. Esta função nos diz que há muitas galáxias de baixa luminosidade absoluta no universo, que seu número decai lentamente até uma certa luminosidade característica e, a partir deste ponto, as galáxias mais luminosas se tornam exponencialmente raras. A função de Schechter é uma das ferramentas mais importantes da astrofísica extragaláctica, pois permite descrever as propriedades da população de galáxias no universo com poucos parâmetros e ao mesmo tempo, investigando possíveis variações nestes parâmetros ao longo do tempo cósmico, e identificar em grandes populações efeitos de formação e evolução de galáxias [47].

Como discutido no início desta seção, mecanismos físicos de formação estelar, distribuição de gás e poeira, dinâmica gravitacional, entre outros, são responsáveis por correlações entre observáveis de cada galáxia. Relações deste tipo são de natureza estatística e, por isso, é necessário um número importante de objetos para caracterizá-las. Com os avanços tecnológicos e aumento do volume de observações ao longo da segunda metade do século, foi-se tornando possível identifi-

car e caracterizar empiricamente relações deste tipo. Para galáxias elípticas, existe uma correlação entre a luminosidade intrínseca e a dispersão de velocidades na região central da galáxia, medida inicialmente por Sandra Faber (1944-) e Richard Jackson (1949-) e assim batizada de relação de Faber-Jackson [64]. Esta relação é um caso particular de uma relação mais geral incluindo o brilho superficial das galáxias, conhecida como plano fundamental e medida uma década mais tarde [65, 66]. Já no caso de galáxias espirais, Brent Tully (1943-) e Richard Fisher (1943-) mediram uma relação entre a largura da linha de emissão de 21cm do hidrogênio e a luminosidade absoluta das galáxias. Esta relação, conhecida como relação de Tully-Fisher, é válida com maior ou menor grau de ruído dependendo da banda de observação [67]. Além de indicarem correlações físicas que podem ser usadas como evidência para o estudo de modelos de formação e evolução de galáxias, estas relações também podem ser importantes para estudos cosmológicos: comparando a estimativa da luminosidade intrínseca com a luminosidade aparente destes objetos, é possível medir a sua distância e assim vincular as propriedades do universo, de forma similar ao feito originalmente por Hubble.

O aumento do volume e qualidade das observações também permitiu investigar questões teóricas ligadas à interação de galáxias com o seu ambiente—em particular, aglomerados de galáxias. Um dos primeiros exemplos é a proposta teórica do mecanismo de *violent relaxation* por Donald Lynden-Bell (1935-2018) [68]. Originalmente, o modelo foi proposto para explicar como sistemas de estrelas entram em equilíbrio estatístico sob a presença de um potencial gravitacional variando rapidamente no tempo. Porém, ele é igualmente válido—em primeira aproximação, considerando as galáxias como puntiformes—para modelar o efeito da formação de um aglomerado nas galáxias ali presentes. Com isto, é possível prever a distribuição de velocidades de galáxias no halo de matéria escura do aglomerado de galáxias, assim como o fato de que as galáxias mais massivas se encontram no centro do aglomerado. Efeitos adicionais devido a forças de maré aceleram a fusão entre galáxias grandes e pequenas, e criam galáxias massivas centrais com luminosidade e morfologia atípicas. Modelos deste

tipo foram propostos para explicar observações, sendo subsequentemente verificados em simulações [69–71].

Estes são apenas alguns dos efeitos ambientais e correlações estatísticas que os mapeamentos de galáxias em grande escala permitem observar. Embora já fosse possível desenvolver modelos sofisticados de processos físicos na formação e evolução de galáxias, o volume de dados em mapeamentos de galáxias ainda era comparativamente pequeno. Os grandes mapeamentos e simulações das décadas seguintes alteraram radicalmente o panorama.

## 4 A era dos grandes mapeamentos

### 4.1 Novas tecnologias e astronomia em grande escala

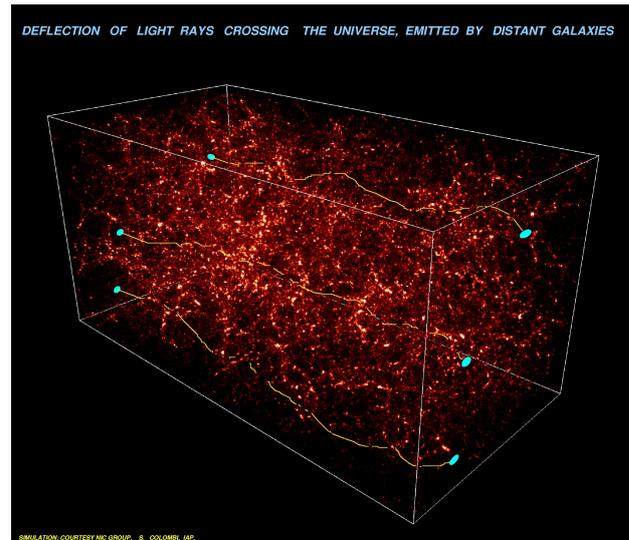
Avanços tecnológicos iniciados nas décadas de 60 e 70 começaram a render frutos na passagem à década de 1990. A primeira etapa foi o planejamento e construção dos grandes telescópios de 4 metros em alguns dos melhores sítios de observação no mundo, principalmente no Chile e no Havaí. Estes novos telescópios começaram a ser equipados com câmeras digitais usando a tecnologia de detectores eletrônicos de silício (CCDs), originalmente desenvolvida na indústria televisiva e em aplicações militares [12]. Em paralelo, o telescópio espacial Hubble foi projetado, construído e finalmente lançado no início dos anos 1990.<sup>5</sup> Embora não tenha sido o primeiro telescópio espacial na faixa do óptico, o Hubble possuía um espelho maior e detectores muito mais avançados, permitindo observações de qualidade nunca antes obtida. Ao entrarem em operação, estes telescópios terrestres e espaciais tiveram impacto direto nos mapeamentos de galáxias, em particular na faixa do óptico; começa a era dos telescópios comunitários, operados por astrônomos residentes profissionais, e com tempo de observação acessível à comunidade geral. Além da democratização do acesso a instrumentos de ponta, a entrada na nova era digital gerou um salto na velocidade de coleta e na qualidade dos dados obtidos, abrindo novas janelas para a exploração do cosmos. Estes efeitos foram plenamente sentidos a partir dos

<sup>5</sup><https://hubblesite.org/home>

anos 2000, com uma explosão de mapeamentos de galáxias de médio porte, cada um reunindo dezenas de astrônomos em colaborações internacionais.

Uma nova área de pesquisa usando o lenteamento gravitacional como observável astronômico surgiu graças a estes desenvolvimentos. O lenteamento gravitacional causado pela estrutura em grande escala do universo ocorre quando a luz de galáxias distantes passa por regiões do espaço que contêm grandes concentrações de matéria. A matéria distorce o espaço-tempo, fazendo com que a luz sofra ligeiros desvios de sua trajetória retilínea. Como resultado, as imagens das galáxias distantes são sutilmente distorcidas, um efeito conhecido como cisalhamento. Embora essas distorções sejam geralmente muito pequenas para serem observadas em galáxias individuais, elas podem ser detectadas estatisticamente ao medir as formas de milhões de galáxias [72]. Este cisalhamento cósmico foi observado pela primeira vez no ano 2000 [73–76], e tornou-se desde então uma das sondas cosmológicas mais importantes, graças à sua capacidade de vincular diretamente a amplitude das flutuações de matéria no universo—incluindo a matéria escura. A Figura 10 mostra uma representação idealizada do cisalhamento cósmico. O lenteamento gravitacional também é uma ferramenta fundamental na escala de aglomerados de galáxias e de galáxias individuais, permitindo sondar diretamente a estrutura dos halos de matéria escura nos quais as galáxias residem.

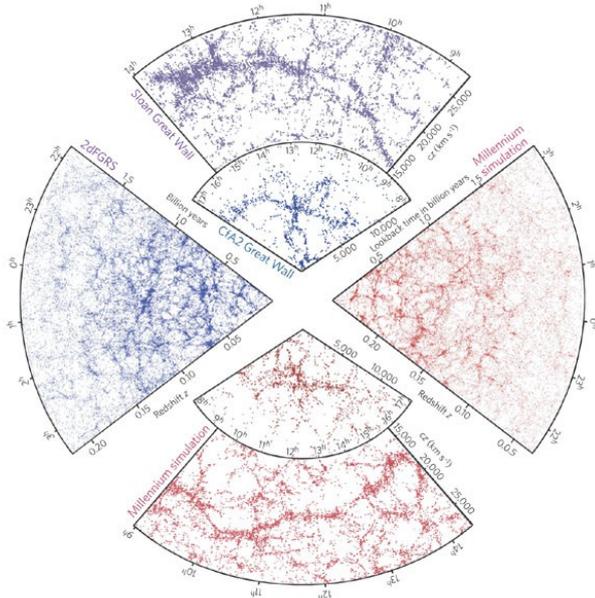
Os avanços descritos acima se referem especificamente a observações com filtros de banda larga na faixa óptica do espectro. Para obter informações precisas sobre a posição tridimensional das galáxias, é necessário realizar medidas espectroscópicas. Até a década de 1990, medir espectros ainda era extremamente custoso. O próximo avanço veio com a invenção de espectrógrafos multi-objeto, permitindo que telescópios observassem simultaneamente espectros de centenas de galáxias. Com este aumento dramático na eficiência, tornou-se possível realizar mapeamentos espectroscópicos contendo centenas de milhares de galáxias. No início dos anos 2000, dois novos grandes mapeamentos de galáxias expandiram radicalmente a nossa visão da estrutura em grande escala. O 2dF Galaxy Redshift Survey (2dF-



**Figura 10:** Representação esquemática do efeito de cisalhamento cósmico. Credit: S. Colombi, IAP,

GRS) [77] obteve uma amostra de quase 250.000 objetos, entre galáxias e quasares, cobrindo uma região de tamanho moderado no céu com maior profundidade e sem efetuar nenhum tipo de pré-seleção. O Sloan Digital Sky Survey (SDSS) [78], por outro lado, observou uma área maior do céu a uma profundidade menor e selecionando galáxias vermelhas, cujo espectro permite medidas de *redshift* com mais facilidade. A Figura 11 mostra a estrutura em grande escala observada por ambos os levantamentos e comparada com simulações cosmológicas reproduzindo os mesmos tipos de seleções observacionais. Esta comparação demonstra cabalmente que os modelos de formação de estruturas implementados nas simulações de n-corpos são qualitativamente acurados e confirmam a estrutura filamentar a enormes distâncias.

O desenvolvimento de mapeamentos de galáxias no século XXI continuou seguindo uma trajetória de criação de novos instrumentos mais avançados, instalados em alguns dos telescópios de 4 metros existentes. Porém, o modelo de organização destes projetos evoluiu para a criação de grandes colaborações de centenas de cientistas. Estas colaborações, em troca da construção e instalação de instrumentos novos nos telescópios já existentes, ganham acesso privilegiado ao instrumento durante seus primeiros anos de operação, realizando assim grandes mapeamentos de galáxias que seriam inviáveis com pedidos de tempo em pequenos grupos. Os principais ma-



**Figura 11:** Comparação entre a distribuição de galáxias observada por mapeamentos de galáxias espectroscópicas e recortes da distribuição de matéria na simulação *Millennium* reproduzindo os efeitos de seleção dos mapeamentos. Em azul e roxo, vemos a estrutura em grande escala medida pelo 2dFGRS e pelo SDSS [79]. Em vermelho, vemos os dados simulados correspondentes. Fica evidente que a física modelada pela simulação é acurada o suficiente para reproduzir qualitativamente os tipos de estrutura observadas no universo.

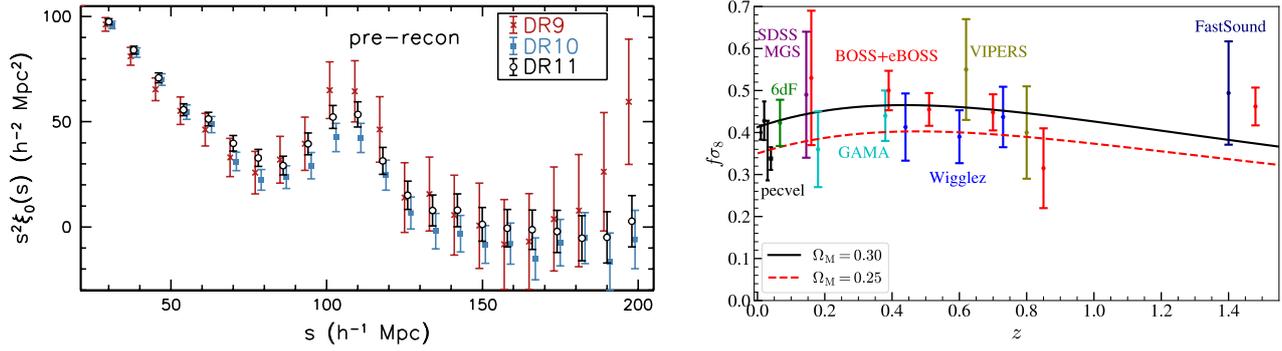
peamentos de galáxias espectroscópicas desta era são os sucessores do mapeamento SDSS original. Do SDSS-II ao SDSS-V, as observações foram repartidas entre colaborações internas ao SDSS — tais como o Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) [80] e o Mapping Nearby Galaxies at APO (MaNGA) [81]—cada uma com diferentes objetivos cosmológicos e astrofísicos. Já no lado fotométrico, os dois grandes mapeamentos desta era são o Dark Energy Survey (DES) [82] e o Kilo Degree Survey (KiDS) [83], ambos combinando medidas da correlação de galáxias e de cisalhamento cósmico para vincular modelos cosmológicos e propriedades da aceleração cósmica, com potencial para descoberta de novas propriedades da energia escura ou modificações da gravitação.

Nesta e na próxima década, mapeamentos de galáxias terrestres e espaciais na faixa do óptico e do infravermelho darão o próximo salto científico e tecnológico. Os satélites Euclid [84] e Nancy Grace Roman Space Telescope [85], o novo mapeamento em banda larga Legacy Survey of Space

and Time (LSST), realizado no Vera Rubin Observatory [86] e o Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) [87], dentre outros projetos, obterão imagens e espectros de objetos de brilho extremamente fraco, cobrindo a maior parte do céu observável. Cada um destes projetos possui características próprias que permitirão avançar além dos limites observacionais atuais, abrindo novas janelas na cosmologia e na astrofísica extragaláctica. Juntos, eles simbolizam uma era de ouro para os mapeamentos de galáxias, onde o emprego de tecnologias avançadas em novos telescópios terrestres e espaciais está remodelando nosso entendimento do universo e das galáxias em escalas cósmicas.

## 4.2 Cosmologia com mapeamentos de galáxias modernos

No início da década de 1990, os mapeamentos de galáxias tinham como um de seus objetivos primordiais medir as propriedades globais do universo. A densidade total de matéria e a curvatura do fundo cosmológico afetam a função de correlação de galáxias no universo recente, e a medida desta última permite inferir o valor destes parâmetros. Notadamente, o APM Galaxy Survey [37, 90] obteve medidas precisas digitalizando as placas fotográficas de um mapeamento de galáxias realizado com o UK Schmidt Telescope no Siding Spring Observatory, Austrália. O APM obteve evidências fortes de que o universo não era unicamente constituído por matéria, seja ela escura ou bariônica. Graças a esta e outras observações, várias composições alternativas para o universo foram propostas e debatidas. Cada uma possuía incompatibilidades com dados observacionais, e a questão continuou em aberto durante grande parte da década de 90. A medida da aceleração cósmica com supernovas de tipo Ia [91, 92] e sua combinação com a medida das anisotropias da radiação cósmica de fundo [93] deixou claro que a densidade de matéria total corresponde a aproximadamente 30% da composição do universo e que este não apresenta curvatura, o que implica que 70% de seu conteúdo é desconhecido. Esta componente pode ser tratada como um fluido exótico, batizado de energia escura, ou como uma descrição efetiva de alguma modificação da teoria da gravidade. Independente da resposta, este se tor-



**Figura 12:** Esquerda: Medida da função de correlação de galáxias pelo mapeamento de galáxias BOSS [88]. Os diferentes conjuntos de pontos representam diferentes etapas de coletas de dados. O pico localizado próximo à escala de  $110 h^{-1} \text{Mpc}$  é um resquício das oscilações acústicas de bárions primordiais, fornecendo uma régua-padrão. Direita: Compilação de medidas da taxa de crescimento de estruturas com diferentes mapeamentos [89]. A linha preta e vermelha indicam previsões feitas pelo modelo  $\Lambda\text{CDM}$  com diferentes valores de densidade de matéria. Uma modificação da intensidade da interação gravitacional também afetaria esta função.

nou o modelo cosmológico padrão, batizado de modelo  $\Lambda\text{CDM}$ .

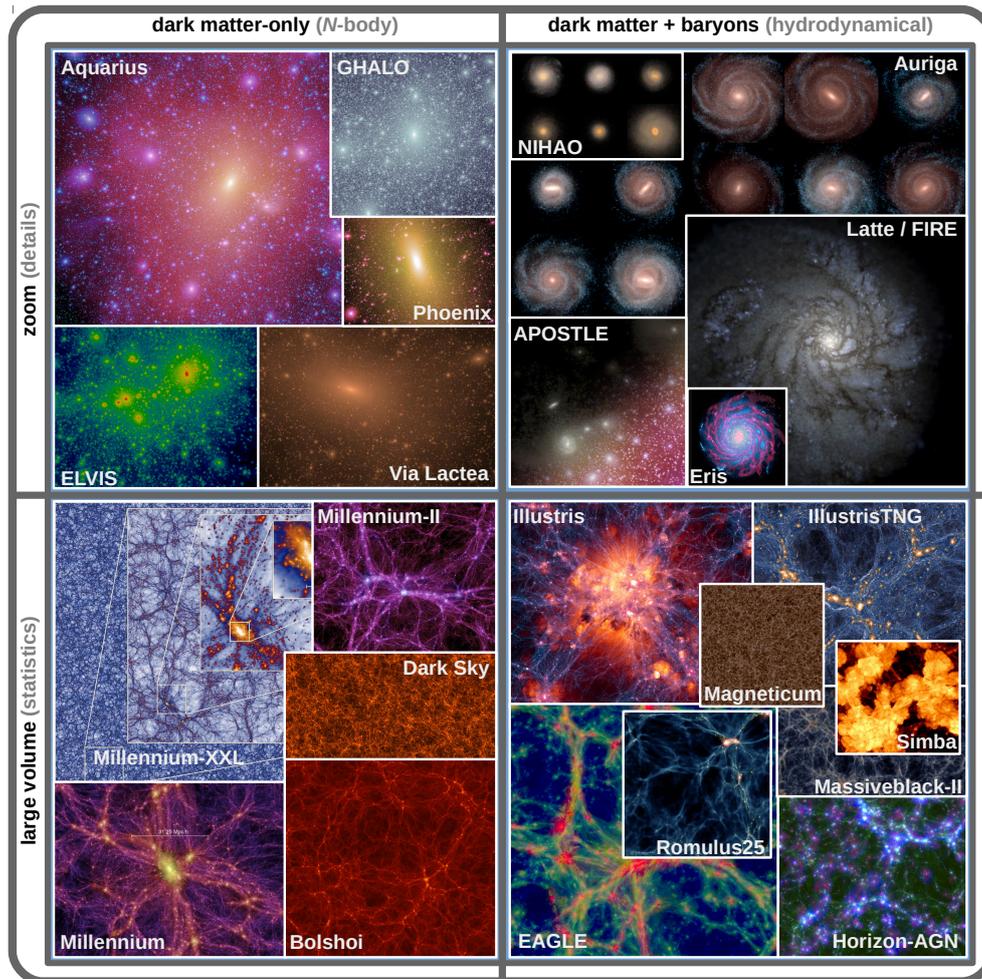
Desde o início dos anos 2000, métodos de medida cosmológica com mapeamentos de galáxias evoluíram radicalmente, respondendo em parte ao grande poder vinculante das novas observações da radiação cósmica de fundo. Medidas cosmológicas com galáxias utilizavam, até este ponto, a forma geral da função de correlação de galáxias para vincular a densidade de matéria total no universo [90].<sup>6</sup> Porém, uma nova maneira de realizar medidas cosmológicas de alta precisão com mapeamentos de galáxias foi proposta no início dos anos 2000 [97, 98]: a evolução do universo tem impacto direto sobre a variação do tamanho de objetos astronômicos com o *redshift*. Identificando uma família de objetos—ou observáveis, em geral—cujo tamanho intrínseco conseguimos inferir, podemos reconstruir a dinâmica cósmica. Chamamos este tipo de observável de régua-padrão. Os trabalhos acima identificaram uma régua-padrão presente na distribuição de galáxias, batizada de oscilações acústicas de bárions.

O que são oscilações acústicas de bárions? Quando o universo ainda é jovem e muito quente, matéria ordinária—principalmente, hidrogênio—e fótons interagem fortemente, formando um

<sup>6</sup>Em muitos casos, o observável principal era o espectro de potência da matéria, uma transformada de Fourier da correlação espacial cuja descrição matemática vai além do escopo deste artigo. O leitor interessado pode consultar livros-texto da área de cosmologia [95, 96]

plasma. A física deste plasma primordial determina que há uma competição entre, de um lado, o efeito de atração gravitacional gerado pela grande quantidade de matéria escura e, de outro, a pressão de radiação do plasma, que resiste à compressão. Estas forças opostas geram flutuações de densidade com um tamanho característico dependendo da densidade relativa de matéria. Este tamanho pode ser observado ao longo das eras cósmicas e relacionado ao tamanho físico original, fornecendo assim uma régua-padrão. As oscilações acústicas de bárions no universo primordial são medidas de maneira extremamente precisa no espectro da radiação cósmica de fundo. De forma complementar, as mesmas oscilações deixam uma assinatura na distribuição de galáxias no céu, pois estas se formam preferencialmente em locais com uma ligeira sobre-densidade de matéria, induzida pela escala das oscilações acústicas. Esta assinatura se apresenta como um pequeno pico na função de correlação, como pode ser visto no painel esquerdo da Figura 12 [88]. A medida desta escala nos mapeamentos de galáxias se tornou uma das formas mais potentes de vincular as propriedades do universo.

A técnica descrita acima envolve o uso da estrutura em grande escala do universo como uma régua-padrão para medir suas propriedades globais em diferentes épocas. Entretanto, informação sobre a taxa de crescimento destas estruturas também pode ser obtida por meios indiretos. Isto permite investigar aspectos cruciais de modelos de gravitação modificada; caso haja uma

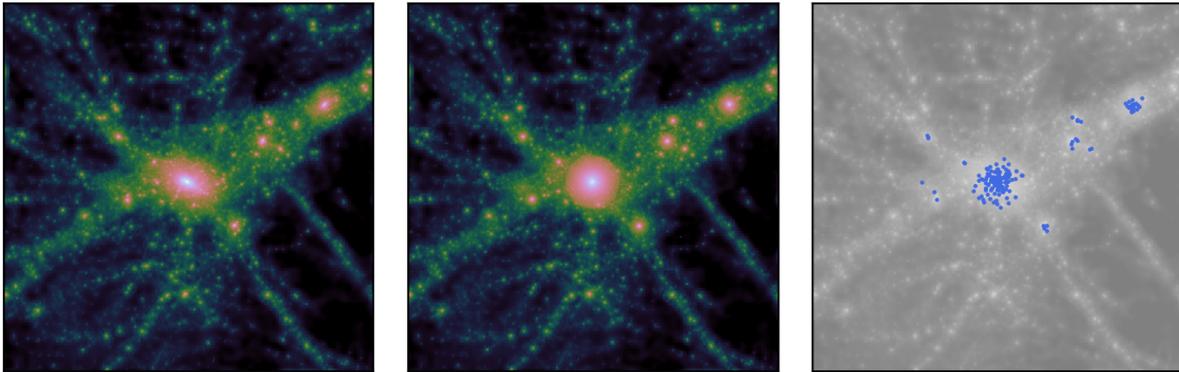


**Figura 13:** Recortes de simulações recentes da estrutura em grande escala e formação de galáxias. No eixo vertical, as simulações estão divididas entre simulações de grande escala, que fornecem amostras estatísticas de galáxias, e simulações de zoom, que possuem maior resolução numérica e podem sondar escalas menores com mais detalhes. No eixo horizontal, as simulações estão divididas em simulações apenas de matéria escura e matéria escura mais bárions [94].

possível variação da intensidade da interação gravitacional, a medida da taxa de crescimento de estruturas em diferentes épocas permite identificar este efeito, como mostrado no painel direito da Figura 12 [89]. O principal método para realizar esta medida é chamado de distorções no espaço de *redshift* [99]. Para entender como o método funciona, é preciso investigar com mais detalhes o efeito do crescimento de estruturas no *redshift* das galáxias. O efeito Doppler causado pela expansão do universo faz com que todas as galáxias tenham seu espectro luminoso deslocado para comprimentos de onda mais avermelhados, um efeito proporcional à distância. Velocidades peculiares se devem aos movimentos individuais de cada galáxia conforme são atraídas gravitacionalmente para regiões de alta densidade de

matéria. Estas regiões formam o que chamamos de poços de potencial gravitacional. Velocidades peculiares causam um efeito Doppler adicional no espectro de cada galáxia. Contrariamente ao *redshift* cosmológico, este efeito não é homogêneo e isotrópico; ele está correlacionado com a distribuição de matéria em grandes escalas e depende da direção na qual uma galáxia está se movendo, relativo a nossa linha de visada. A relação entre as velocidades peculiares e a densidade de matéria é mediada pela intensidade da interação gravitacional e, assim, podemos obter indiretamente informações sobre a força gravitacional em regimes muito além da nossa capacidade de realizar medidas diretas.

Os métodos de medida descritos nesta seção são os principais métodos empregados para me-



**Figura 14:** Visualização esquemática do procedimento proposto pelo modelo de halos [100]. Esquerda: recorte de uma simulação de  $n$ -corpos sem o efeito de física bariônica. A elipse central é um halo massivo de matéria escura. Centro: halos de matéria escura que o modelo de halos usaria neste caso. É importante notar que os halos do modelo de halos são esféricos, contrariamente aos halos simulados inicialmente. Direita: Um modelo de conexão galáxia-halo permite popular os halos do modelo. Cada ponto azul representa uma galáxia.

didias cosmológicas em mapeamentos de galáxias espectroscópicas. No caso de mapeamentos de galáxias fotométricos, o lenteamento gravitacional fraco é um importante método complementar que deriva seu poder vinculante da capacidade de sondar diretamente as perturbações de matéria totais.

### 4.3 Halos de matéria escura e a conexão galáxia-halo

Nos últimos 30 anos, simulações cosmológicas se tornaram cada vez mais centrais para interpretar e modelar os mapeamentos de galáxias. Um desenvolvimento crucial dessa era foi a formulação e validação do perfil Navarro-Frenk-White (NFW), um modelo que descreve a densidade de matéria em halos de matéria escura [101]. O modelo NFW propôs que a densidade dos halos segue um perfil universal, com apenas dois parâmetros ajustáveis. A simplicidade do perfil NFW fez dele uma ferramenta fundamental para o estudo da distribuição de matéria escura em aglomerados de galáxias e seu papel na formação e evolução das galáxias. As simulações desta era também continuaram a contribuir para a compreensão do impacto de modelos cosmológicos na morfologia e topologia da estrutura filamentar do universo [102].

Desde o início dos anos 2000, o aumento exponencial de poder computacional e sofisticação algorítmica permitiram gerar simulações de ma-

téria escura em volumes cósmicos e resoluções sem precedentes. Um marco dessa era foi a simulação Millenium [103], fornecendo uma descrição detalhada da distribuição de matéria escura e da complexa arquitetura da teia cósmica. Adicionalmente, um avanço significativo na evolução das simulações cosmológicas foi a incorporação do que chamamos de física bariônica, permitindo uma modelagem abrangente dos efeitos da dinâmica dos gases, formação estelar e mecanismos de retroalimentação de estrelas e buracos negros supermassivos, embora em volumes bem menores do que as simulações de matéria escura (e.g. [104]). Atualmente, as simulações cosmológicas são ferramentas cruciais para interpretar uma ampla gama de dados astronômicos, conciliando modelos teóricos com observações empíricas. A Figura 13 mostra imagens de mais de uma dezena de simulações realizadas nos últimos 20 anos, classificando-as em função das escalas que são capazes de modelar e se incluem ou não matéria bariônica.

Embora as simulações forneçam uma descrição qualitativa muito refinada da estrutura em grande escala do universo, colocar esta descrição em termos quantitativos e compará-la com dados observacionais é um problema complexo e muitas vezes intratável. Uma maneira alternativa de atacar este problema é o modelo de halos, proposto no início do milênio [105–107]. O conceito de halo de matéria escura já havia sido formulado desde a década de 70 para interpretar as observações

de aglomerados de galáxias, explicar o processo de formação de galáxias em aglomerados [108] e descrever as curvas de rotação de galáxias espirais. O modelo de halos propõe que uma descrição efetiva da estrutura em grande escala exclusivamente em termos de halos de matéria escura é uma excelente aproximação. Conhecendo as propriedades e a distribuição espacial destes halos, podemos estimar as propriedades estatísticas da distribuição de matéria. O passo seguinte necessário para modelar a função de correlação de galáxias é descrever como as galáxias ocupam halos de diferentes massas. O problema então se divide em dois: (i) como as galáxias se organizam dentro de um dado halo e; (ii) como os halos se distribuem no espaço. Essa informação pode ser motivada por ou extraída de simulações numéricas, levando a um modelo analítico flexível das propriedades estatísticas da teia cósmica. A Figura 14 ilustra o princípio do modelo de halos, onde as partículas de matéria numa simulação são agrupadas e associadas a halos, cuja massa é definida como proporcional à densidade de partículas presentes [100].

Confrontando esse modelo com observações, a abordagem do modelo de halos pode fornecer restrições sobre a cosmologia subjacente do Universo, além de oferecer uma visão única da conexão galáxia-halo e avançar nosso entendimento da formação e evolução de galáxias. Graças ao grande volume de simulações cosmológicas e às ferramentas da cosmologia e gravitação teóricas, temos bons modelos de como os halos se distribuem. Infelizmente, não temos a mesma compreensão sobre como as galáxias se organizam dentro de um halo. Este problema atende pelo nome de conexão galáxia-halo, e elucidar essa conexão é um passo para responder a várias das maiores questões em astrofísica e cosmologia hoje [109]. De um ponto de vista astrofísico, podemos buscar entender a física da formação de galáxias: Como o gás esfria nas galáxias, como as estrelas se formam e o que determina os processos de retroalimentação dominantes? Como podemos inferir melhor a física a partir das observações disponíveis, incluindo a distribuição espacial das galáxias em função de suas propriedades?

Grande parte dos desenvolvimentos teóricos na área de formação e evolução de galáxias se deram em sincronia com os grandes avanços ob-

servacionais proporcionados pelos novos mapeamentos de galáxias. Principalmente a partir do advento do 2dFGRS e do SDSS, já citados num contexto cosmológico, foi possível obter amostras de galáxias ordens de magnitude maiores do que anteriormente, o que permitiu muito mais precisão no estudo de correlações estatísticas entre suas propriedades físicas, como luminosidade e cor ou massa estelar e taxa de formação de estrelas (SFR). Além destes grandes mapeamentos, uma gama de projetos ao longo das últimas décadas forneceu observações em diversos comprimentos de onda, resolução e profundidade; um exemplo é o mapeamento Galaxy And Mass Assembly (GAMA), cujos objetivos principais envolveram verificar observacionalmente algumas das previsões dos modelos de formação e evolução de galáxias e seus respectivos halos, conforme discutido ao longo deste artigo [110].

É impossível fazer justiça à imensa atividade na área de formação e evolução de galáxias nas últimas décadas e sua relação com mapeamentos de galáxias. Artigos de revisão sobre as observações [111], sobre modelos físicos de formação e evolução de galáxias [112, 113], sobre modelos de halo [100] e da conexão halo-galáxia [109] e sobre simulações cosmológicas [94, 114] fornecem ao leitor interessado múltiplos pontos de entrada a esta vasta literatura.

## 5 Conclusões

Neste artigo, descrevemos a evolução histórica dos mapeamentos de galáxias e sua contribuição fundamental para o desenvolvimento da astrofísica extragaláctica e da cosmologia. Desde as primeiras observações sistemáticas de objetos extragalácticos—à época, conhecidos como nebulosas—os mapeamentos de galáxias realizam descobertas que suscitam perguntas profundas sobre a natureza do universo e seus constituintes, na mesma proporção em que buscam responder às perguntas trazidas pelas observações já existentes. Para avançar neste processo, construímos telescópios e instrumentos cada vez mais potentes que simultaneamente criam e se alimentam dos desenvolvimentos tecnológicos contemporâneos. Consequentemente, ao reconstruir uma história do progresso dos mapeamentos de galáxias

e suas tecnologias, estamos simultaneamente entendendo o processo pelo qual construímos nosso conhecimento sobre o universo e sobre a formação e evolução de galáxias.

Num primeiro momento, os mapeamentos de galáxias desempenharam um papel crucial para estabelecer a natureza extragaláctica das nebulosas, alterando radicalmente nossa compreensão sobre a Via Láctea e seu lugar no universo. Com o surgimento da ideia de que existe um número incontável de galáxias no universo, surge imediatamente a ideia de classificar estes objetos para melhor entender suas propriedades. Em paralelo, os mapeamentos de galáxias também fornecem comprovação observacional dos modelos cosmológicos formulados a partir da relatividade geral, tanto pela medida da expansão do universo quanto pelas primeiras observações de uma homogeneidade e isotropia estatísticas. Hubble foi uma figura de proa em ambos os eixos, estabelecendo as primeiras bases para nosso entendimento atual do universo e das galáxias.

Após a Segunda Guerra Mundial e até o fim da década de 1980, o ritmo de descobertas se acelera, em grande parte graças a avanços tecnológicos gestados no esforço de guerra, como o desenvolvimento de computadores, instrumentos digitais e telescópios observando em diferentes comprimentos de onda e em escalas cada vez maiores. O resultado é um progresso significativo em várias direções, incluindo: a aplicação de técnicas estatísticas para o estudo da estrutura em grande escala na distribuição de galáxias; o entendimento progressivo de processos físicos da formação e evolução de galáxias e o desenvolvimento de simulações numéricas detalhadas, permitindo investigar tanto o impacto de colisões de galáxias na variedade morfológica observada quanto às propriedades da estrutura em grande escala. Uma nova descoberta que permeia todos estes temas é a existência de matéria escura, tanto em halos englobando galáxias quanto nos nós e filamentos da estrutura em grande escala, moldando sua topologia. As observações do período, em particular o advento do CfA Redshift Survey, confirmam o paradigma da matéria escura fria, que se torna um dos pilares do modelo cosmológico padrão.

A construção de grandes telescópios equipados com câmeras digitais e espectrógrafos multi-objetos e a realização de grandes mapeamentos

de galáxias envolvendo de dezenas a centenas de cientistas gera uma nova revolução observacional, acompanhada pelo desenvolvimento de grandes simulações cosmológicas, agora também modelando em alguns casos a física do gás, estrelas e buracos negros. Os mapeamentos de galáxias espectroscópicos observam um número de galáxias de duas a três ordens de grandeza maior do que levantamentos anteriores, enquanto que simultaneamente se desenvolve a técnica do lenteamento gravitacional pela estrutura em grande escala, permitindo medir diretamente a distribuição de matéria escura no universo. Do ponto de vista da cosmologia, estes avanços permitem vincular de maneira cada vez mais rigorosa as propriedades básicas do universo e buscar possíveis alterações da gravidade potencialmente ligadas à energia escura ou a uma teoria alternativa de gravitação. Já na área de formação e evolução de galáxias, o modelo de halos e a conexão galáxia-halo ganham força como uma descrição fenomenológica que pode ser comparada com observações das propriedades de galáxias e calibrada com simulações cosmológicas, abrindo as portas para uma compreensão das propriedades estatísticas de grandes populações de galáxias.

Na próxima década, uma nova geração de mapeamentos de galáxias tem o potencial de revolucionar mais uma vez a nossa compreensão da cosmologia e da astrofísica extragaláctica. Reafirmando o tema central deste artigo, a relação simbiótica entre inovação tecnológica e descoberta científica se mantém, manifestando-se no papel crítico que os mapeamentos de galáxias exercem no avanço da astrofísica e cosmologia. Até hoje, o universo não cessa de nos surpreender, e a história dos mapeamentos de galáxias sugere que novas descobertas continuarão a surgir.

### **Agradecimentos**

Agradeço o apoio da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), processo nº E-26/2010.203/2019; ao Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) pela hospitalidade continuada; ao LIneA e ao BPG-LSST pelo suporte técnico e científico nas atividades ligadas ao Rubin Observatory Legacy Survey of Space and

Time e ao IF-UFRJ pelo suporte institucional. Agradeço a Felipe Tovar Falciano pelo convite e pela enorme paciência com os múltiplos atrasos, e à Sarah, Arthur, Juca e Léa pelo apoio e paciência durante a escrita.

---

### Sobre o autor

Bruno Azevedo Lemos Moraes ([moraes@if.ufrj.br](mailto:moraes@if.ufrj.br)) é professor adjunto e pesquisador do Instituto de Física da UFRJ. É especialista em cosmologia observacional, área de pesquisa na interface entre a cosmologia e a astrofísica extragaláctica. Seu principal foco de pesquisa é na análise de mapeamentos de galáxias fotométricos e compreensão de contaminantes astrofísicos e observacionais, buscando vincular parâmetros cosmológicos e a massa de neutrinos. É membro do Rubin Observatory Legacy Survey of Space and Time por meio de seu Brazilian Participation Group (BPG-LSST).

### Referências

- [1] T. E. O. Rosse, *Observations on the Nebulae*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I **140**, 499 (1850).
- [2] C. Messier, *Catalogue des Nébuleuses et des Amas d'Étoiles* (Imprimerie royale, Paris, 1781).
- [3] J. F. W. Herschel, *Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars*, [Philosophical Transactions of the Royal Society of London](#) **154**, 1 (1864).
- [4] J. L. E. Dreyer, *A New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars, being the Catalogue of the late Sir John F.W. Herschel, Bart., revised, corrected, and enlarged*, Memoirs of the Royal Astronomical Society **49**, 1 (1888).
- [5] J. L. E. Dreyer, *Index Catalogue of Nebulae found in the years 1888 to 1894, with Notes and Corrections to the New General Catalogue*, Memoirs of the Royal Astronomical Society **51**, 185 (1895).
- [6] J. L. E. Dreyer, *Second Index Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars; Containing Objects Found in the Years 1895 to 1907, with Notes and Corrections to the New General Catalogue and to the Index Catalogue for 1888–94*, Memoirs of the Royal Astronomical Society **59**, 105 (1908).
- [7] J. Fraunhofer, *Bestimmung des Brechungs- und des Farbenzerstreungs-Vermögens verschiedener Glasarten, in Bezug auf die Vervollkommnung achromatischer Fernrohre*, [Annalen der Physik](#) **56**(7), 264 (1817).
- [8] G. Kirchhoff, *Untersuchungen über das Sonnenspektrum und die Spectren der Chemischen Elemente (Part 1)*, Abhandlungen der königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **1**, 63 (1861).
- [9] G. Kirchhoff, *Untersuchungen über das Sonnenspektrum und die Spectren der Chemischen Elemente (Part 1 continued)*, Abhandlungen der königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **1**, 227 (1862).
- [10] G. Kirchhoff, *Untersuchungen über das Sonnenspektrum und die Spectren der Chemischen Elemente (Part 2)*, Abhandlungen der königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **1**, 225 (1863).
- [11] C. Doppler, *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels*, Abhandlungen der Königlichen Böhmischen Gesellschaft der Wissenschaften **2**, 465 (1842).
- [12] M. S. Longair, *The Cosmic Century: A History of Astrophysics and Cosmology* (Cambridge University Press, 2006).
- [13] H. S. Leavitt e E. C. Pickering, *Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud*, Harvard College Observatory Circular **173**, 1 (1912).

- [14] E. P. Hubble, *Cepheids in Spiral Nebulae*, in *Publications of the American Astronomical Society* (1925), vol. 5 de *Publications of the American Astronomical Society*, 261–264.
- [15] E. P. Hubble, *Extragalactic nebulae*, *The Astrophysical Journal* **64**, 321 (1926).
- [16] E. P. Hubble, *Realm of the Nebulae* (Yale University Press, New Haven, 1936).
- [17] V. M. Slipher, *A Spectrographic Investigation of Spiral Nebulae*, *Proceedings of the American Philosophical Society* **56**, 403 (1917).
- [18] E. Hubble, *A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae*, *Proceedings of the National Academy of Science* **15**(3), 168 (1929).
- [19] E. Hubble e M. L. Humason, *The Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae*, *The Astrophysical Journal* **74**, 43 (1931).
- [20] A. Sandage, *The Hubble Atlas of Galaxies*, Carnegie Institution of Washington Publication 618 (Carnegie Institution of Washington, Washington, 1961).
- [21] A. Toomre e J. Toomre, *Galactic Bridges and Tails*, *The Astrophysical Journal* **178**, 623 (1972).
- [22] K. G. Jansky, *Radio Waves from Outside the Solar System*, *Nature* **132**(3323), 66 (1933).
- [23] G. Reber, *Notes: Cosmic Static*, *The Astrophysical Journal* **91**, 621 (1940).
- [24] F. Hoyle, *A New Model for the Expanding Universe*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **108**, 372 (1948).
- [25] J. Shakeshaft et al., *A survey of radio sources between declinations  $-38^\circ$  and  $+83^\circ$* , *Memoirs of the Royal Astronomical Society* **67**, 106 (1955).
- [26] A. A. Penzias e R. W. Wilson, *A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s*, *The Astrophysical Journal* **142**, 419 (1965).
- [27] I. Heywood, M. J. Jarvis e J. J. Condon, *Sample variance, source clustering and their influence on the counts of faint radio sources*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **432**(4), 2625 (2013). [ArXiv:1302.2010](#).
- [28] D. Saadeh et al., *How Isotropic is the Universe?*, *Physical Review Letters* **117**(13), 131302 (2016). [ArXiv:1605.07178](#).
- [29] C. D. Shane e C. A. Wirtanen, *The distribution of extragalactic nebulae*, *The Astronomical Journal* **59**, 285 (1954).
- [30] J. Neyman e E. L. Scott, *A Theory of the Spatial Distribution of Galaxies*, *The Astrophysical Journal* **116**, 144 (1952).
- [31] J. Neyman, E. L. Scott e C. D. Shane, *On the Spatial Distribution of Galaxies: a Specific Model*, *The Astrophysical Journal* **117**, 92 (1953).
- [32] J. Neyman, E. L. Scott e C. D. Shane, *The Index of Clumpiness of the Distribution of Images of Galaxies*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **1**, 269 (1954).
- [33] D. N. Limber, *The Analysis of Counts of the Extragalactic Nebulae in Terms of a Fluctuating Density Field*, *The Astrophysical Journal* **117**, 134 (1953).
- [34] D. N. Limber, *The Analysis of Counts of the Extragalactic Nebulae in Terms of a Fluctuating Density Field II*, *The Astrophysical Journal* **119**, 655 (1954).
- [35] V. C. Rubin, *Fluctuations in the Space Distribution of the Galaxies*, *Proceedings of the National Academy of Science* **40**(7), 541 (1954).
- [36] V. J. Martínez e E. Saar, *Statistics of the Galaxy Distribution* (Chapman and Hall/CRC, 2002).
- [37] S. J. Maddox et al., *Galaxy correlations on large scales*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **242**, 43P (1990).

- [38] M. Davis et al., *A survey of galaxy redshifts. II. The large scale space distribution*, *The Astrophysical Journal* **253**, 423 (1982).
- [39] J. Huchra et al., *A survey of galaxy redshifts. IV - The data*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **52**, 89 (1983).
- [40] P. J. E. Peebles, *Cosmology's Century: An Inside History of our Modern Understanding of the Universe* (Princeton University Press, 2020).
- [41] P. J. E. Peebles, *The large-scale structure of the universe* (Princeton University Press, 1980).
- [42] M. Joeveer e J. Einasto, *Has the Universe the Cell Structure?*, in *Large Scale Structures in the Universe*, editado por M. S. Longair e J. Einasto (1978), vol. 79, 241.
- [43] F. Zwicky, *Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln*, *Helvetica Physica Acta* **6**, 110 (1933).
- [44] G. O. Abell, *The Distribution of Rich Clusters of Galaxies*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **3**, 211 (1958).
- [45] T. S. van Albada et al., *Distribution of dark matter in the spiral galaxy NGC 3198*, *The Astrophysical Journal* **295**, 305 (1985).
- [46] C. S. Frenk, *Galaxy Clustering and the Dark-Matter Problem*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A* **320**(1556), 517 (1986).
- [47] H. Mo, F. C. van den Bosch e S. White, *Galaxy Formation and Evolution* (Cambridge University Press, 2010).
- [48] V. C. Rubin e J. Ford, W. Kent, *Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions*, *The Astrophysical Journal* **159**, 379 (1970).
- [49] D. H. Rogstad e G. S. Shostak, *Gross Properties of Five Scd Galaxies as Determined from 21-Centimeter Observations*, *The Astrophysical Journal* **176**, 315 (1972).
- [50] J. Einasto, A. Kaasik e E. Saar, *Dynamic evidence on massive coronas of galaxies*, *Nature* **250**(5464), 309 (1974).
- [51] J. P. Ostriker, P. J. E. Peebles e A. Yahil, *The Size and Mass of Galaxies, and the Mass of the Universe*, *The Astrophysical Journal* **193**, L1 (1974).
- [52] V. C. Rubin, J. Ford, W. K. e N. Thonnard, *Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605 ( $R=4kpc$ ) to UGC 2885 ( $R=122kpc$ )*, *The Astrophysical Journal* **238**, 471 (1980).
- [53] G. Efstathiou, *The clustering of galaxies and its dependence upon OMEGA*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **187**, 117 (1979).
- [54] V. A. Lyubimov et al., *An estimate of the  $\nu_e$  mass from the  $\beta$ -spectrum of tritium in the valine molecule*, *Physics Letters B* **94**(2), 266 (1980).
- [55] G. R. Blumenthal et al., *Formation of galaxies and large-scale structure with cold dark matter*, *Nature* **311**, 517 (1984).
- [56] S. D. M. White, C. S. Frenk e M. Davis, *Clustering in a neutrino-dominated universe*, *The Astrophysical Journal* **274**, L1 (1983).
- [57] M. Davis et al., *The evolution of large-scale structure in a universe dominated by cold dark matter*, *The Astrophysical Journal* **292**, 371 (1985).
- [58] G. Bertone e D. Hooper, *History of dark matter*, *Reviews of Modern Physics* **90**(4), 045002 (2018). [ArXiv:1605.04909](https://arxiv.org/abs/1605.04909).
- [59] C. S. Frenk e S. D. M. White, *Dark matter and cosmic structure*, *Annalen der Physik* **524**(9-10), 507 (2012). [ArXiv:1210.0544](https://arxiv.org/abs/1210.0544).
- [60] J. E. Gunn e I. Gott, J. Richard, *On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution*, *The Astrophysical Journal* **176**, 1 (1972).

- [61] J. E. Gunn, *The Friedmann Models and Optical Observations in Cosmology*, in *Saas-Fee Advanced Course 8: Observational Cosmology Advanced Course*, editado por A. Maeder, L. Martinet e G. Tammann (1978).
- [62] A. Dressler, *Galaxy morphology in rich clusters: implications for the formation and evolution of galaxies*, *The Astrophysical Journal* **236**, 351 (1980).
- [63] P. Schechter, *An analytic expression for the luminosity function for galaxies*, *The Astrophysical Journal* **203**, 297 (1976).
- [64] S. M. Faber e R. E. Jackson, *Velocity dispersions and mass-to-light ratios for elliptical galaxies*, *The Astrophysical Journal* **204**, 668 (1976).
- [65] S. Djorgovski e M. Davis, *Fundamental Properties of Elliptical Galaxies*, *The Astrophysical Journal* **313**, 59 (1987).
- [66] A. Dressler et al., *Spectroscopy and Photometry of Elliptical Galaxies. I. New Distance Estimator*, *The Astrophysical Journal* **313**, 42 (1987).
- [67] R. B. Tully e J. R. Fisher, *A new method of determining distances to galaxies*, *Astronomy and Astrophysics* **54**, 661 (1977).
- [68] D. Lynden-Bell, *Statistical mechanics of violent relaxation in stellar systems*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **136**, 101 (1967).
- [69] J. P. Ostriker e S. D. Tremaine, *Another evolutionary correction to the luminosity of giant galaxies*, *The Astrophysical Journal* **202**, L113 (1975).
- [70] A. Sandage e E. Hardy, *The Redshift-Distance Relation. VII. Absolute Magnitudes on the First Three Ranked Cluster Galaxies as Functions of Cluster Richness and Bautz-Morgan Cluster Type: the Effect of  $q_0$* , *The Astrophysical Journal* **183**, 743 (1973).
- [71] M. A. Hausman e J. P. Ostriker, *Galactic cannibalism. III. The morphological evolution of galaxies and clusters*, *The Astrophysical Journal* **224**, 320 (1978).
- [72] M. Bartelmann e P. Schneider, *Weak gravitational lensing*, *Physics Reports* **340**(4-5), 291 (2001). [ArXiv:astro-ph/9912508](#).
- [73] L. Van Waerbeke et al., *Detection of correlated galaxy ellipticities from CFHT data: first evidence for gravitational lensing by large-scale structures*, *Astronomy and Astrophysics* **358**, 30 (2000). [ArXiv:astro-ph/0002500](#).
- [74] N. Kaiser, G. Wilson e G. A. Luppino, *Large-Scale Cosmic Shear Measurements*, arXiv (2000). [ArXiv:astro-ph/0003338](#).
- [75] D. J. Bacon, A. R. Refregier e R. S. Ellis, *Detection of weak gravitational lensing by large-scale structure*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **318**, 625 (2000). [ArXiv:astro-ph/0003008](#).
- [76] D. M. Wittman et al., *Detection of weak gravitational lensing distortions of distant galaxies by cosmic dark matter at large scales*, *Nature* **405**, 143 (2000). [ArXiv:astro-ph/0003014](#).
- [77] M. Colless et al., *The 2dF Galaxy Redshift Survey: Final Data Release*, arXiv e-prints [astro-ph/0306581](#) (2003). [ArXiv:astro-ph/0306581](#).
- [78] D. G. York et al., *The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary*, *The Astronomical Journal* **120**(3), 1579 (2000). [ArXiv:astro-ph/0006396](#).
- [79] V. Springel, C. S. Frenk e S. D. M. White, *The large-scale structure of the Universe*, *Nature* **440**(7088), 1137 (2006). [ArXiv:astro-ph/0604561](#).
- [80] K. S. Dawson et al., *The Baryon Oscillation Spectroscopic Survey of SDSS-III*, *The Astronomical Journal* **145**(1), 10 (2013). [ArXiv:1208.0022](#).

- [81] K. Bundy et al., *Overview of the SDSS-IV MaNGA Survey: Mapping nearby Galaxies at Apache Point Observatory*, *The Astrophysical Journal* **798**(1), 7 (2015). [ArXiv:1412.1482](#).
- [82] The Dark Energy Survey Collaboration, *The Dark Energy Survey*, [arXiv, astro-ph/0510346](#) (2005).
- [83] J. T. de Jong et al., *The Kilo-Degree Survey*, *The Messenger* **154**, 44 (2013).
- [84] R. Laureijs et al., *Euclid Definition Study Report*, [arXiv, 1110.3193](#) (2011).
- [85] R. Akeson et al., *The Wide Field Infrared Survey Telescope: 100 Hubbles for the 2020s*, [arXiv, 1902.05569](#) (2019).
- [86] Ž. Ivezić et al., *LSST: From Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products*, *The Astrophysical Journal* **873**(2), 111 (2019). [ArXiv:0805.2366](#).
- [87] DESI Collaboration, *The DESI Experiment Part I: Science, Targeting, and Survey Design*, [arXiv, 1611.00036](#) (2016).
- [88] L. Anderson et al., *The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: baryon acoustic oscillations in the Data Releases 10 and 11 Galaxy samples*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **441**(1), 24 (2014). [ArXiv:1312.4877](#).
- [89] D. Huterer, *Growth of cosmic structure*, *Astronomy and Astrophysics Review* **31**(1), 2 (2023). [ArXiv:2212.05003](#).
- [90] G. Efstathiou, W. J. Sutherland e S. J. Maddox, *The cosmological constant and cold dark matter*, *Nature* **348**(6303), 705 (1990).
- [91] A. G. Riess et al., *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, *The Astronomical Journal* **116**(3), 1009 (1998). [ArXiv:astro-ph/9805201](#).
- [92] S. Perlmutter et al., *Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 High-Redshift Supernovae*, *The Astrophysical Journal* **517**(2), 565 (1999). [ArXiv:astro-ph/9812133](#).
- [93] D. N. Spergel et al., *First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **148**(1), 175 (2003). [ArXiv:astro-ph/0302209](#).
- [94] M. Vogelsberger et al., *Cosmological simulations of galaxy formation*, *Nature Reviews Physics* **2**(1), 42 (2020). [ArXiv:1909.07976](#).
- [95] S. Dodelson e F. Schmidt, *Modern Cosmology* (Academic Press, 2020).
- [96] D. Baumann, *Cosmology* (Cambridge University Press, 2022).
- [97] C. Blake e K. Glazebrook, *Probing Dark Energy Using Baryonic Oscillations in the Galaxy Power Spectrum as a Cosmological Ruler*, *The Astrophysical Journal* **594**(2), 665 (2003). [ArXiv:astro-ph/0301632](#).
- [98] D. J. Eisenstein et al., *Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies*, *The Astrophysical Journal* **633**(2), 560 (2005). [ArXiv:astro-ph/0501171](#).
- [99] N. Kaiser, *Clustering in real space and in redshift space*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **227**, 1 (1987).
- [100] M. Asgari, A. J. Mead e C. Heymans, *The halo model for cosmology: a pedagogical review*, *The Open Journal of Astrophysics* **6**, 39 (2023). [ArXiv:2303.08752](#).
- [101] J. F. Navarro, C. S. Frenk e S. D. M. White, *The Structure of Cold Dark Matter Halos*, *The Astrophysical Journal* **462**, 563 (1996). [ArXiv:astro-ph/9508025](#).
- [102] G. Kauffmann et al., *Clustering of galaxies in a hierarchical universe - I. Methods and results at  $z=0$* , *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **303**(1), 188 (1999). [ArXiv:astro-ph/9805283](#).

- [103] V. Springel et al., *Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars*, *Nature* **435**(7042), 629 (2005). [ArXiv:astro-ph/0504097](#).
- [104] M. Vogelsberger et al., *Introducing the Illustris Project: simulating the coevolution of dark and visible matter in the Universe*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **444**(2), 1518 (2014). [ArXiv:1405.2921](#).
- [105] U. Seljak, *Analytic model for galaxy and dark matter clustering*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **318**(1), 203 (2000). [ArXiv:astro-ph/0001493](#).
- [106] C.-P. Ma e J. N. Fry, *Deriving the Non-linear Cosmological Power Spectrum and Bispectrum from Analytic Dark Matter Halo Profiles and Mass Functions*, *The Astrophysical Journal* **543**(2), 503 (2000). [ArXiv:astro-ph/0003343](#).
- [107] J. A. Peacock e R. E. Smith, *Halo occupation numbers and galaxy bias*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **318**(4), 1144 (2000). [ArXiv:astro-ph/0005010](#).
- [108] S. D. M. White e M. J. Rees, *Core condensation in heavy halos: a two-stage theory for galaxy formation and clustering*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **183**, 341 (1978).
- [109] R. H. Wechsler e J. L. Tinker, *The Connection Between Galaxies and Their Dark Matter Halos*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **56**, 435 (2018). [ArXiv:1804.03097](#).
- [110] J. Liske et al., *Galaxy And Mass Assembly (GAMA): end of survey report and data release 2*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **452**(2), 2087 (2015). [ArXiv:1506.08222](#).
- [111] M. R. Blanton e J. Moustakas, *Physical Properties and Environments of Nearby Galaxies*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **47**(1), 159 (2009). [ArXiv:0908.3017](#).
- [112] T. Naab e J. P. Ostriker, *Theoretical Challenges in Galaxy Formation*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **55**(1), 59 (2017). [ArXiv:1612.06891](#).
- [113] R. S. Somerville e R. Davé, *Physical Models of Galaxy Formation in a Cosmological Framework*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **53**, 51 (2015). [ArXiv:1412.2712](#).
- [114] R. E. Angulo e O. Hahn, *Large-scale dark matter simulations*, *Living Reviews in Computational Astrophysics* **8**(1), 1 (2022). [ArXiv:2112.05165](#).