

O grande debate sobre a estrutura do Universo

Júlio C. Fabris¹ e Felipe T. Falciano²

¹Universidade Federal do Espírito Santo

²Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Resumo

Em 1920, a Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos organizou um debate entre Heber Curtis e Halow Shapley sobre a escala do Universo. Havia várias questões em jogo, mas sobressaem-se dois assuntos centrais: o tamanho da Via Láctea e a possibilidade das nebulosas espirais serem ou não galáxias externas à Via Láctea. Este episódio ficou conhecido como o grande debate e foi registrado em duas publicações em 1921 no Bulletin of the National Research Council. Além de sua importância histórica, o grande debate mostra os detalhes da construção do nosso conhecimento sobre o Universo.

Abstract

In 1920, the National Academy of Sciences organized a debate between Heber Curtis and Halow Shapley on the scale of the Universe. There were several issues at stake, but two central issues stood out: the size of the Milky Way and whether or not the spirals nebulae were galaxies outside the Milky Way. This episode became known as the great debate and was recorded in two publications in 1921 in the Bulletin of the National Research Council. In addition to its historical importance, the great debate shows the details of the construction of our knowledge of the Universe.

Palavras-chave: galáxia, cosmologia, grande debate, universo-ilhas.

Keywords: galaxy, cosmology, great debate, island universes.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43798](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43798)

1 Introdução

No início do século 20, os métodos observacionais recentemente desenvolvidos, como a relação entre classe espectral e magnitude absoluta das estrelas por Ejnar Hertzsprung e independentemente por Henry Russell, ou a relação período-luminosidade de estrelas variáveis por Henrietta Leavitt, expandiram de forma significativa o alcance das medidas de distância dos objetos astronômicos. Nessa época, a astronomia dedicava-se a questões basilares como a classificação dos objetos observados, suas formas e suas distâncias.

Da perspectiva de um pesquisador do século 21, é incrível o quanto aprendemos sobre o universo em apenas um século. Hoje em dia, sabemos que o universo está em expansão a pelo menos 13,7 bilhões de anos a partir de um estado muito denso e com altas temperaturas (altas energias). Gradualmente as pequenas perturbações de matéria e energia aglutinaram-se formando as primeiras estruturas e posteriormente condensando-se e for-

mando as estruturas que observamos: estrelas, nebulosas, galáxias, aglomerados de galáxias, filamentos, etc.

O universo observável estende-se por distâncias da ordem de 14 bilhões de parsec (1 parsec $\sim 3,26$ anos-luz ou $\sim 3,1 \times 10^{13}$ km) com uma quantidade enorme de galáxias e estrelas. Há ainda questões fundamentais a serem esclarecidas, como a natureza da energia e matéria escuras. Contudo, o nosso conhecimento sobre o universo é sólido o suficiente para a comunidade científica acordar na existência de um modelo padrão da cosmologia.

Nas primeiras décadas do século 20, o cenário era diferente. Debatia-se sobre como as estruturas astronômicas organizavam-se pelo universo. Estimava-se que a Via Láctea deveria ser, com boa probabilidade, uma galáxia espiral, mas a localização do nosso sistema solar, se perto ou afastado do centro da galáxia, era motivo de controversa entre os astrônomos da época. Foi neste contexto que ocorreu o grande debate [1].

Em 26 de Abril de 1920, a Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos organizou o encontro anual na Smithsonian Institution em Washington D.C. O então secretário da academia, Charles G. Abbot, aceitou a sugestão de G. E. Hale em promover uma Hale Lecture, financiada pelo (*memorial fund*) fundo de caridade em homenagem a seu pai, William Ellery Hale.

A proposta era organizar um debate em uma das noites do evento. Aventou-se a possibilidade do tema ser a recente teoria da relatividade geral, mas devido à diversidade do público e a tecnicidade do assunto, Abbot optou pelo o outro assunto proposto, a saber, a escala do Universo. Os dois palestrantes convidados foram Harlow Shapley e Heber Curtis. Este encontro entre Shapley e Curtis ficou conhecido como o Grande Debate [2–5].

É interessante observar que a importância deste evento só ficou evidente muito tempo depois. O próprio Shapley comenta, em suas memórias [6], ter se surpreendido quando viu pela primeira vez a referência a este evento como algo histórico. Isto é compreensível já que questões históricas só podem ser propriamente entendidas com o passar do tempo e o necessário distanciamento para a análise dos acontecimentos.

Há dois assuntos centrais no grande debate. Durante sua apresentação, Shapley, fiel ao título do debate, desenvolveu de forma abrangente os motivos que o levaram a estimar o tamanho da Via Láctea com valor maior que outras estimativas da época. Por outro lado, Curtis, que trabalhava já alguns anos com nebulosas espirais, dedicou substancialmente sua apresentação a justificar a proposta do universo insular.

Curtis pleitava que as nebulosas espirais eram galáxias como a Via Láctea. Elas seriam externas e da mesma ordem de tamanho que a Via Láctea. Nesta visão, as galáxias estariam distribuídas como ilhas no universo.

Não é a primeira vez que esta ideia se apresenta. Immanuel Kant, em seus escritos científicos [7] propõe que o sistema solar tivesse sido formado pela condensação de uma nebulosa. O desdobramento de seu raciocínio foi a formulação de universos-ilha que é uma noção próxima ao que entendemos hoje por galáxias (evidentemente sem considerar a matéria escura). Contudo, uma diferença importante deve ser salien-

tada. Kant elenca este cenário baseado no seu desenvolvimento metafísico e não apresenta nenhuma base empírica. Sua proposta deve ser entendida apenas como uma hipótese, enquanto o debate entre Curtis e Shapley substancia-se em observações astronômicas.

Shapley questionava o conceito de universos-ilhas devido as escalas de distância que inviabilizariam este cenário.

Além da diferença na interpretação do tema do debate, a abordagem dos dois palestrantes também foi bem distinta. A apresentação de Curtis foi mais técnica e detalhada. Ademais, apesar do nome, o encontro não foi propriamente um debate mas duas apresentações sobre questões relacionadas.

Devido a todos esses fatores, após o episódio, ambos pesquisadores concordaram em colocar por escrito seus argumentos, os quais foram então publicados em 1921 no Bulletin of the National Research Council [1].

Na preparação que antecedeu a Hale Lectures, Shapley e Curtis fizeram suas apresentações de forma independente. Porém, para a publicação escrita, os autores trocaram correspondência ao preparar seus artigos com o intuito de cada um ter a oportunidade de considerar os argumentos e o ponto de vista do outro. O resultado são os dois textos referidos como o grande debate e traduzidos a seguir desta nota introdutória.

Ao ler os dois textos vemos que Shapley e Curtis discordam em vários pontos. Virginia [4] coleciona 14 tópicos e aponta de maneira sucinta sua interpretação de quem estava mais próximo do que hoje entendemos como correto em cada um dos pontos. Shapley, por exemplo, um especialista em aglomerados globulares, argumentou de maneira correta que as estrelas F, G e K identificadas em aglomerados globulares eram gigantes como as estrelas gigantes F-K locais.

Um outro ponto muito importantes defendido por Shapley foi a utilização da relação entre período e luminosidade das variáveis Cefeidas como indicadores de distância confiáveis. De fato, as Cefeidas são hoje em dia um dos degraus sólidos na escala de medida de distância em cosmologia. Porém, para fazer justiça, devemos notar que Curtis não se opõe a possibilidade de usar as Cefeidas como indicadores de distância. Seu argumento era que, dada as incertezas a época,

ainda era cedo para usá-las como base de argumentação para outras análises; ele defendia que mais dados eram necessários para validação de tal técnica.

O argumento de Shapley contra o cenário de universo insular advinha das dificuldades que certas observações impunham caso a Via Láctea tivesse o tamanho por ele defendido. Shapley estimou que a Via Láctea tivesse 300 mil anos-luz (1 parsec \sim 3,26 anos-luz), um valor 10 vezes maior do que outras estimativas da época, as quais eram usadas por Curtis. Apesar de ambos estarem com estimativas imprecisas, Shapley trouxe à tona a ideia de que a nossa galáxia deveria ser bem maior do que estimava-se e isso gera dificuldades para a teoria do universo insular.

O estudo de Van Maanen, colega de Shapley no observatório de Mount Wilson, sobre o movimento próprio de rotação das nebulosas espirais colocava em cheque a ideia delas serem objetos extra-galácticos. A distância estimada no contexto do universo insular com a medida de rotação de Van Maanen indicava que a velocidade das regiões externas das nebulosas espirais deveriam ser maior que a velocidade da luz.

Outro ponto levantado era a observação de novas. Se as nebulosas espirais estivessem fora da nossa galáxia, o valor da magnitude absoluta das novas observadas nestes objetos seriam ordens de grandeza maior do que as novas observadas na Via Láctea. O argumento de Curtis com relação a este problema das novas era que estes fenômenos poderiam estar relacionados com duas classes de objetos astronômicos. Além disso, Curtis não estava seguro da calibração das novas observadas em nebulosas espirais.

Ambos debatedores estavam certos sobre pontos cruciais e errado em outros. Shapley por exemplo, estava certo em argumentar que a dimensão da Via Láctea era bem maior do que pleiteada por seus contemporâneos defensores do universo insular. Além disso, ele apontou a importância do uso das Cefeidas como indicadores de distância. Por outro lado, Curtis acertou na hipótese do universo insular e em apontar que as nebulosas espirais eram galáxias independentes e separadas da Via Láctea.

Os registros históricos mostram que tanto Curtis quanto Shapley saíram do debate acreditando que haviam levado a melhor. De uma certa forma,

como a proposta de cada um no debate foi diferente, não é errôneo concordar que ambos saíram vitoriosos. Com efeito, nos anos que sucederam o grande debate, a comunidade astronômica continuou dividida em opiniões. Mas vale notar que a importância do debate foi sobretudo organizar as discussões em torno do tema e ajudar a comunidade a identificar os pontos que mereciam ser explorados e melhorados. Como saldo, mais do que Curtis ou Shapley, foi a ciência astronômica que saiu vencedora deste grande debate.

Sobre os tradutores

Júlio C. Fabris (julio.fabris@cosmo-ufes.org) é professor titular do Departamento de Física da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e pesquisador do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Suas atividades científicas versam sobre física teórica, com especial ênfase em cosmologia e gravitação.

Felipe T. Falciano (ftovar@cbpf.br) é Doutor em Física (2008) pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e Mestre em Filosofia (2017) pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Desde 2009 é pesquisador do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, vinculado a coordenação COSMO, e pesquisador do CNPq, atuando nas áreas de cosmologia e gravitação.

Referências

- [1] H. Shapley e H. D. Curtis, *The scale of the universe*, Bulletin of the National Research Council **2**(11), 171 (1921). Disponível em <https://archive.org/details/scaleofuniverse00shap/page/172/mode/2up>, acesso em mar. 2024.
- [2] C. A. Whitney, *The Discovery of Our Galaxy* (Random House Inc, New York, 1971).
- [3] R. Berendzen, R. Hart e D. Seeley, *Man Discovers the Galaxies* (Columbia University Press, New York, 1984).
- [4] V. Trimble, *The 1920 Shapley-Curtis Discussion: Background, Issues, and Aftermath*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **107**, 1133 (1995).

-
- [5] L. Belkora, *Minding the Heavens: the story of our discovery of the Milky Way* (Institute of Physics Publishing, London, 2003).
- [6] H. Shapley, *Through rugged ways to the stars* (New York, 1969).
- [7] I. Kant, *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels* (Harald Fischer Verlag Gmb, 1755), versão em inglês: Eric Watkins (ed.), *Kant: Natural Science* (Cambridge University Press, 2015).

A escala do Universo – Parte I

Harlow Shapley

Mount Wilson Observatory, Carnegie Institution of Washington

Este discurso e o seguinte, do Dr. Heber D. Curtis, são adaptados de palestras ilustres proferidas na Fundação William Ellery Hale perante a Academia Nacional de Ciências, em 26 de abril de 1920. Os autores trocaram os artigos ao prepará-los para publicação, para que cada um pudesse ter a oportunidade de considerar o ponto de vista do outro.

Evolução da ideia do tamanho da galáxia

O universo¹ físico era antropocêntrico para o homem primitivo. Numa fase subsequente do progresso intelectual, centrou-se numa área restrita da superfície da Terra. Ainda mais tarde, para Ptolomeu e sua escola, o universo era geocêntrico. Na época de Copérnico, o Sol, como corpo dominante do sistema solar, era considerado no centro do sistema estelar ou próximo dele. Com a origem de cada uma destas concepções sucessivas, o sistema de estrelas pareceu sempre maior do que se pensava anteriormente. Assim, a importância do homem e da Terra no esquema sideral diminuiu com o avanço do conhecimento do mundo físico, e a nossa concepção das dimensões do universo estelar discernível mudou progressivamente. Não seria possível novas mudanças das nossas concepções? Diante da grande acumulação de informações novas e relevantes, poderemos manter firmemente as nossas antigas concepções cósmicas?

Como consequência do excepcional crescimento das atividades dos grandes observatórios, com os seus poderosos métodos de análise das estrelas e de sondagem do espaço, atingimos uma época, creio eu, em que outro avanço é necessário; a nossa concepção do sistema galáctico deve ser alargada para manter numa relação adequada os objetos que os nossos telescópios encontram; o sistema solar não consegue mais manter uma posição central. Estudos recentes sobre aglomerados e assuntos relacionados parecem-me não deixar

nenhuma alternativa à crença de que o sistema galáctico é pelo menos dez vezes maior em diâmetro – pelo menos mil vezes maior em volume – do que se supunha recentemente.

Dr. Curtis², por outro lado, sustenta que o sistema galáctico tem as dimensões e o arranjo anteriormente atribuídos a ele pelos estudiosos da estrutura sideral — ele apoia as opiniões sustentadas há cerca de uma década por Newcomb, Charlier, Eddington, Hertzsprung, e outros líderes da astronomia estelar. Em contraste com a minha estimativa atual de um diâmetro de pelo menos trezentos mil anos-luz, Curtis descreve a sua posição da seguinte forma:³

Quanto às dimensões da galáxia indicadas pela nossa Via Láctea, até recentemente houve um bom grau de uniformidade nas estimativas daqueles que investigaram o assunto. Praticamente todos deduziram diâmetros de 7.000 a 30.000 anos-luz. Assumirei um diâmetro galáctico máximo de 30.000 anos-luz como representando suficientemente bem esta visão mais antiga que subscrevo, embora esta seja certamente demasiado grande.

Penso que deveria ser salientado que, quando Newcomb escrevia sobre o assunto, há cerca de vinte anos, o conhecimento dos factores especiais que se relacionam diretamente com o tamanho do Universo era extremamente fragmentário em comparação com a nossa informação de hoje. Em 1900, por exemplo, eram conhecidos os movimentos radiais de cerca de 300 estrelas; agora conhecemos as velocidades radiais de milhares.

¹A palavra “universo” é usada neste artigo no sentido restrito, aplicando-se ao conjunto de sistemas siderais atualmente conhecidos.

²Veja Parte II do presente artigo, por Heber D. Curtis.

³Citado de uma cópia manuscrita de seu discurso em Washington

As distâncias precisas eram então registradas para possivelmente 150 das estrelas mais brilhantes, e agora para mais de dez vezes este número. Os espectros eram então disponíveis para menos de um décimo das estrelas para as quais temos hoje esta informação. Praticamente nada se sabia naquela época sobre os métodos fotométricos e espectroscópicos para determinar distâncias; nada sobre velocidades radiais dos aglomerados globulares ou das nebulosas espirais, ou mesmo do fenômeno do fluxo estelar.

Como indicação adicional da importância de examinar novamente as evidências sobre o tamanho dos sistemas estelares, consideremos o grande aglomerado globular em Hércules – uma vasta organização sideral sobre a qual tínhamos, até recentemente, apenas ideias vagas. Devido a pesquisas extensas e variadas, realizadas durante os últimos anos no Monte Wilson e em outros lugares, sabemos agora as posições, magnitudes e cores de todas as suas estrelas mais brilhantes, e muitas relações entre cor, magnitude, distância do centro e densidade de estrelas. Conhecemos algumas destas importantes correlações com maior certeza no aglomerado de Hércules do que na vizinhança solar. Agora temos os espectros de muitas estrelas individuais e o tipo espectral e a velocidade radial do aglomerado como um todo. Conhecemos os tipos e períodos de variação da luz das suas estrelas variáveis, as cores e tipos espectrais destas variáveis, e também algo sobre a luminosidade absoluta das estrelas mais brilhantes do aglomerado a partir da aparência dos seus espectros. Será surpreendente, portanto, que nos aventuremos a determinar a distância de Messier 13 e de sistemas semelhantes com mais confiança do que era possível há dez anos, quando nenhum destes factos era conhecido, ou mesmo considerado seriamente em especulações cósmicas?

Se ele estivesse escrevendo agora, com conhecimento destes desenvolvimentos relevantes, acredito que Newcomb não manteria a sua visão anterior sobre as dimensões prováveis do sistema galáctico.

Por exemplo, Professor Kapteyn encontrou ocasião, com o progresso dos seus elaborados estudos das leis da luminosidade e densidade estelar, para indicar dimensões da galáxia maiores do que as anteriormente aceitas. Num artigo publicado recentemente em Mount Wilson Contribu-

tion, nº 188,⁴ ele descobriu, como resultado de uma pesquisa que se estendeu por cerca de 20 anos, que a densidade das estrelas ao longo do plano galáctico é bastante apreciável a uma distância de 40.000 anos-luz — dando um diâmetro do sistema galáctico, excluindo nuvens estelares distantes da Via Láctea, cerca de três vezes o valor que Curtis admite como máximo para toda a galáxia. Da mesma forma, Russell, Eddington e, creio, Hertzsprung, agora subscrevem valores maiores de dimensões galácticas; e Charlier, numa palestra recente perante a Associação Astronômica Sueca, aceitou as características essenciais indicando uma galáxia de maior dimensão, muito embora anteriormente tenha identificado o sistema local de estrelas B com todo o sistema galáctico e obtido as distâncias dos aglomerados e a dimensão da galáxia apenas um centésimo do tamanho que deduzo.

Pesquisando a vizinhança solar

Recordemos primeiro que o universo estelar, tal como o conhecemos, parece ser um esferoide ou elipsoide muito achatado – um sistema em forma de disco composto principalmente por estrelas e nebulosas. O sistema solar não está longe do plano médio desta organização achatada que chamamos de sistema galáctico. Olhando para longe do plano vemos relativamente poucas estrelas; olhando ao longo do plano, através de uma grande profundidade do espaço povoado de estrelas, vemos um grande número de objetos siderais que constituem a faixa de luz que chamamos de Via Láctea. Os aglomerados de estrelas vagamente organizados, como as Plêiades, as nebulosas difusas, como a grande nebulosa de Órion, as galáxias planetárias nebulosas, das quais a nebulosa em anel em Lyra é um bom exemplo, as nebulosidades escuras — todos esses tipos siderais parecem fazer parte do grande sistema galáctico e situam-se quase exclusivamente ao longo do plano da Via Láctea. Os aglomerados globulares, embora não estejam na Via Láctea, também estão ligados ao sistema galáctico; as nebulosas espirais parecem ser objetos distantes, podendo estar mesmo fora das partes mais populosas da região galáctica.

⁴A contribuição é publicada em conjunto com o Dr. van Rhijn.

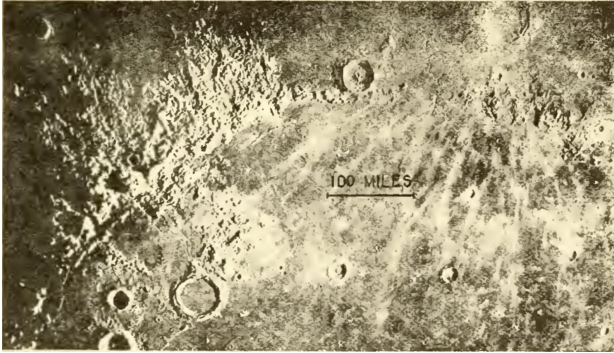


Figura 1: A região do Apenninus na superfície da Lua como fotografada por um refletor de 100-polegadas. Fotografado por F. G. Pease.

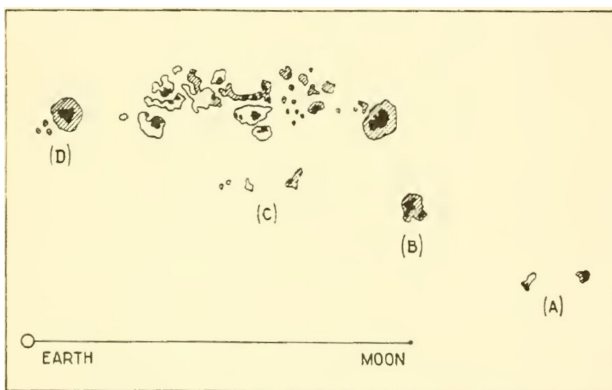


Figura 2: Um grupo de manchas solares surgidas primeiramente em Fevereiro de 1920 e durando por cerca de 100 dias. As regiões com e sem sombras indicam polaridade magnética de sinais opostos.

Esta concepção do sistema galáctico, como uma organização achatada de estrelas e nebulosas em forma de relógio, com aglomerados globulares e nebulosas espirais como objetos externos, é geralmente aceita pelos estudiosos do assunto; mas na questão das distâncias dos vários objetos siderais – o tamanho do sistema galáctico – há, como sugerido acima, opiniões amplamente divergentes. Iremos, portanto, primeiro considerar brevemente as dimensões daquela parte do universo estelar sobre a qual existe unanimidade essencial de opinião, e mais tarde discutiremos com mais detalhes o campo mais amplo, onde parece haver necessidade de modificação da visão convencional mais antiga.

Possivelmente a forma mais conveniente de ilustrar a escala do universo sideral seja através das nossas réguas de medição, que vão das unidades terrestres às dos sistemas estelares. Na superfície da Terra expressamos distâncias em uni-

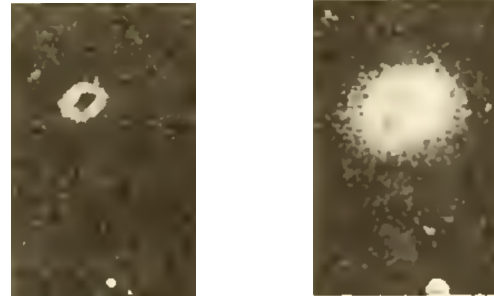


Figura 3: Duas fotografias sucessivas na mesma placa da nebulosa difusa N. G. C. 221, com o refletor de 100 polegadas, para ilustrar a possibilidade de aumentar consideravelmente a potência fotográfica de um grande refletor através da utilização de dispositivos acessórios. O tempo de exposição para a fotografia da esquerda foi de quinze minutos; foi de cinco minutos para a fotografia da direita, efetuada com o auxílio do intensificador fotográfico descrito em Proc. Nat. Acad. Set., 6, 127, 1920. Para a elaboração da figura, as duas fotografias foram ampliadas à mesma escala.

dades como polegadas, pés ou milhas. Na Lua, como pode ser visto na fotografia anexa feita com o refletor de 100 polegadas, a milha ainda é uma unidade de medida utilizável; uma escala de 100 milhas é indicada na região lunar.

Contudo, a nossa escala de medição deve ser grandemente aumentada quando consideramos as dimensões de uma estrela – distâncias na superfície do nosso Sol, por exemplo. As grandes manchas solares mostradas na ilustração não podem ser medidas convenientemente em unidades apropriadas à distância terrestre – na verdade, toda a Terra não é muito grande em comparação. A unidade para medir as distâncias do Sol aos planetas que o acompanham é, no entanto, 12.000 vezes o diâmetro da Terra; é a chamada unidade astronômica, a distância média da Terra ao Sol. Esta unidade, com 93 milhões de milhas de comprimento, é adequada para as distâncias de planetas e cometas. Provavelmente seria suficiente medir as distâncias de quaisquer planetas e cometas que possam existir nas proximidades de outras estrelas; mas, por sua vez, torna-se complicado expressar as distâncias de uma estrela a outra, pois algumas delas estão a centenas de milhões, até mesmo a milhares de milhões, de unidades astronômicas de distância.

Isto leva-nos a abandonar a unidade astronômica e a introduzir o ano-luz como medida para sondar a profundidade do espaço estelar. A distância que a luz percorre num ano é algo inferior a

seis milhões de milhões de milhas. A distância da Terra ao Sol é, nessas unidades, de oito minutos-luz. A distância até a Lua é de 1,2 segundos-luz. Em algumas fases dos nossos problemas astronômicos (estudar fotografias de espectros estelares) fazemos medidas microscópicas diretas de um décimo de milésimo de polegada; e indiretamente medimos mudanças no comprimento de onda da luz um milhão de vezes menores que isso; ao discutir a disposição dos aglomerados globulares no espaço, devemos medir cem mil anos-luz. Expressando essas grandes e pequenas medidas com referência à velocidade da luz, temos uma ilustração da escala do universo do astrônomo — suas medidas variam desde a trilionésima parte de um bilionésimo de um segundo de luz até mais de mil séculos-luz. A proporção da maior medida para a menor é de 10^{33} para 1.

Deve-se notar que a luz desempenha um papel muito importante no estudo do universo; conhecemos a física e a química das estrelas apenas através de sua luz, e expressamos sua distância de nós por meio da velocidade da luz. Além disso, o ano-luz tem um valor duplo na exploração sideral: é geométrico, como vimos, e é histórico. Diz-nos não apenas a que distância um objeto está, mas também há quanto tempo a luz que examinamos começou a percorrer o seu caminho. Você não vê o Sol onde ele está, mas onde estava há oito minutos. Não se veem estrelas fracas da Via Láctea como são agora, mas é mais provável que se vejam como eram quando as pirâmides do Egito estavam sendo construídas; e os antigos egípcios os viam como eram em uma época ainda mais remota. Estamos, portanto, cronologicamente muito atrás dos acontecimentos quando estudamos as condições ou o comportamento dinâmico em sistemas estelares remotos; os movimentos, emissões de luz e variações agora investigados no aglomerado de Hércules não são contemporâneos, mas, se seu valor da distância estiver correto, são fenômenos de 36 mil anos atrás. A grande idade desses pulsos de energia radiante que chegam não é, entretanto, nenhuma desvantagem; na verdade, a sua antiguidade foi aproveitada para testar a velocidade da evolução estelar, para indicar as enormes idades das estrelas, para sugerir a vasta extensão do universo no tempo e no espaço.

Tomando o ano-luz como uma unidade satisfatória para expressar as dimensões dos sistemas

siderais, consideremos as distâncias de estrelas e aglomerados vizinhos e mencionemos brevemente os métodos de dedução de suas posições espaciais. Para objetos estelares próximos podemos fazer medidas trigonométricas diretas de distância (paralaxe), usando a órbita da Terra ou o caminho do Sol através do espaço como linha de base. Para muitas das estrelas mais distantes estão disponíveis métodos espectroscópicos, usando a aparência dos espectros estelares e o brilho aparente facilmente mensurável das estrelas. Para certos tipos de estrelas, muito distantes para dados espectroscópicos, ainda existe a possibilidade de obter a distância por meio do método fotométrico. Este método é particularmente adequado para estudos de aglomerados globulares; consiste primeiro em determinar, de alguma forma, a real luminosidade de uma estrela, isto é, sua chamada magnitude absoluta, e em segundo lugar, na medição de sua magnitude aparente. Obviamente, se uma estrela de brilho real conhecido se afasta para distâncias cada vez maiores, o seu brilho aparente diminui; portanto, para tais estrelas de magnitude absoluta conhecida, é possível, usando uma fórmula simples, determinar a distância medindo a magnitude aparente.

Parece, portanto, que embora o espaço possa ser explorado até uma distância de apenas algumas centenas de anos-luz por métodos trigonométricos diretos, não somos forçados, pela nossa incapacidade de medir ângulos ainda menores, a extrapolar com incerteza ou a fazer suposições vagas relativas a regiões distantes ao espaço, pois as distâncias determinadas trigonometricamente podem ser usadas para calibrar as ferramentas e métodos mais novos e menos restritos. Por exemplo, os métodos trigonométricos de medição da distância à Lua, ao Sol e às estrelas mais próximas são decididamente indiretos, em comparação com a medição linear da distância na superfície da Terra, mas não são por essa razão inexatos ou questionáveis em princípio. Os métodos espectroscópicos e fotométricos de medição de grandes distâncias estelares também são indiretos, em comparação com a medição trigonométrica de pequenas distâncias estelares, mas também não são, por essa razão, pouco confiáveis ou de valor duvidoso. Estas grandes distâncias não são extrapolações. Por exemplo, no método espectroscópico, as magnitudes absolutas derivadas de dis-

tâncias medidas trigonometricamente são usadas para derivar as curvas que relacionam as características espectrais à magnitude absoluta; e as paralaxes espectroscópicas de estrelas individuais (próximas ou remotas) são, quase sem exceção, interpolações. Assim, os dados das estrelas mais próximas são utilizados para fins de calibração e não como base para extrapolação.

Por um método ou outro, as distâncias de quase 3.000 estrelas individuais na vizinhança solar foram agora determinadas; apenas algumas estão a dez anos-luz do Sol. A uma distância de cerca de 130 anos-luz encontramos as Híades, o conhecido aglomerado de estrelas que pode ser visto a olho nu; a uma distância de 600 anos-luz, de acordo com as extensas investigações de Kapteyn, chegamos ao grupo de estrelas azuis em Orion – outro aglomerado fisicamente organizado composto por estrelas gigantes em luminosidade. A distâncias comparáveis aos valores acima encontramos também o grupo Escorpião-Centauro, as Plêiades, o sistema Ursa Maior.

Esses aglomerados próximos são especificamente mencionados por dois motivos.

Em primeiro lugar, desejo salienta a prevalência, em todo o sistema galáctico, de aglomerados de estrelas, organizados de diversas maneiras quanto à densidade estelar e ao conteúdo estelar total. A organização gravitacional das estrelas é uma característica fundamental do universo uma estrela dupla é um aspecto dos aglomerados estelares, um sistema galáctico é outro. Podemos, de fato, traçar o motivo do agrupamento desde os mais ricos aglomerados globulares isolados, como o sistema de Hércules, até aos grupos próximos vagamente organizados, tipificados nas estrelas brilhantes da Ursa Maior. Se estivesse cem vezes a sua presente distância, o aglomerado de Orion seria muito parecido com Messier 37 ou Messier 11: dezenas de aglomerados observados apenas por telescópios têm a forma geral e a densidade estelar das Plêiades e das Híades. A diferença entre aglomerados brilhantes e fracos do sistema galáctico parece ser apenas uma questão de distância.

Em segundo lugar, desejo enfatizar o fato de que usamos as estrelas próximas como padrões de luminosidade, particularmente as estrelas azuis do tipo espectral B que são membros de aglomerados estelares. Nisto reside um ponto muito

importante na aplicação de métodos fotométricos. Poderíamos, talvez, questionar a validade de comparar as estrelas isoladas na vizinhança do Sol com estrelas num aglomerado compacto; mas a comparação de aglomerados de estrelas próximos com aglomerados de estrelas remotos é inteiramente razoável, uma vez que estamos agora tão longe das noções antropocêntricas primitivas que é tolice postular que a distância da Terra tem algo a ver com o brilho intrínseco das estrelas.

Sobre as distâncias dos aglomerados globulares

1. Como afirmado acima, os astrônomos concordam quanto às distâncias às estrelas próximas e aos grupos estelares – a escala da parte do universo que podemos chamar de domínio solar. Mas ainda não há acordo relativamente às distâncias de aglomerados remotos, estrelas e nuvens estelares – a escala do sistema galáctico total. A discordância neste último particular não é uma pequena diferença de alguns por cento, um argumento sobre pequenos detalhes; é uma questão de mil por cento ou mais.

Curtis sustenta que as dimensões que encontro para o sistema galáctico deveriam ser divididas por dez ou mais (ver citação na página 172); portanto, esse tamanho galáctico não impede a interpretação das nebulosas espirais como galáxias comparáveis (uma teoria que ele defende por outros motivos, mas que considera incompatível com os valores maiores das dimensões galácticas). Em seu discurso em Washington, no entanto, ele simplificou bastante a presente discussão ao aceitar os resultados de estudos recentes sobre os seguintes pontos significativos.

Proposição A — Os aglomerados globulares fazem parte da nossa galáxia, portanto o tamanho do sistema galáctico propriamente dito não é provavelmente menor que o tamanho do sistema subordinado de aglomerados globulares.

Proposição B — As distâncias derivadas no Observatório de Monte Wilson para aglomerados globulares em relação uns aos outros estão essencialmente corretas. Isto implica, entre outras coisas, que (1) a absorção de luz no espaço não afetou sensivelmente os resultados, e (2) os aglomerados globulares são muito semelhantes em es-

trutura e constituição, diferindo principalmente na distância. (Esses valores relativos são baseados em diâmetros aparentes, magnitudes integradas, magnitudes de estrelas gigantes individuais ou grupos de estrelas gigantes e variáveis Cefeidas; Charlier obteve praticamente os mesmos resultados apenas com diâmetros aparentes, e Lundmark obteve a partir de diâmetros aparentes e magnitudes integradas.)

Proposição C — Estrelas em aglomerados em partes distantes da Via Láctea não são peculiares — isto é, a uniformidade das condições e dos fenômenos estelares prevalece naturalmente em todo o sistema galáctico.

Também partilhamos a mesma opinião, creio eu, nos seguintes pontos.

- (a) O sistema galáctico é uma organização estelar extremamente achatada e a aparência Via Láctea é em parte devido à existência de nuvens distintas de estrelas, e é em parte o resultado da profundidade ao longo do plano galáctico.
- (b) As nebulosas espirais são, em sua maioria, objetos muito distantes, provavelmente não membros físicos do nosso sistema galáctico.
- (c) Se a nossa galáxia se aproximar da ordem maior de dimensões, surge imediatamente uma séria dificuldade para a teoria de que as nebulosas espirais são galáxias de estrelas comparáveis em tamanho às nossas: seria necessário atribuir magnitudes impossivelmente grandes às novas estrelas que aparecem nas nebulosas espirais.

2. Através de um acordo aproximado sobre os pontos acima, o caminho é aberto para que a diferença notável possa ser claramente declarada: Curtis não acredita que o valor numérico da distância que deduzo para qualquer aglomerado globular seja da ordem correta de grandeza.

3. O presente problema pode ser estreitamente restrito, portanto, e pode ser formulado da seguinte forma: mostre que qualquer aglomerado globular é aproximadamente tão distante quanto derivado das observações do Observatório de Monte Wilson; então a distância de outros aglomerados será aproximadamente correta (ver Proposição B), o sistema de aglomerados e o sis-

tema galáctico terão dimensões da ordem atribuída (ver Proposição A), e a teoria das espirais da “galáxia comparável” terá encontrado uma dificuldade séria, embora talvez não insuperável.

Em outras palavras, para manter minha posição será suficiente mostrar que qualquer um dos aglomerados globulares brilhantes tem aproximadamente a distância em anos-luz dada abaixo, em vez de uma distância de um décimo deste valor ou menos:⁵

| Aglomerado | Distância em anos-luz | Magnitude fotográfica média das 25 estrelas mais brilhantes | |
|------------|-----------------------|---|----------|
| | | Aparente | Absoluta |
| Messier 13 | 36.000 | 13,75 | -1,5 |
| Messier 3 | 45.000 | 14,23 | -1,5 |
| Messier 5 | 38.000 | 13,97 | -1,4 |
| Omega | | | |
| Centauri | 21.000 | 12,3 | -1,8 |

Da mesma forma, seria suficiente mostrar que os objetos brilhantes são estrelas gigantes (cf. última coluna acima), em vez de estrelas de luminosidade comparável à do Sol.

4. Pela observação sabemos que alguns ou os quatro aglomerados listados na tabela contêm:

- (a) Um intervalo de pelo menos nove magnitudes (aparente e absoluta) entre as estrelas mais brilhantes e mais fracas.
- (b) Uma faixa de índice de cores de $-0,5$ a $+2,0$, correspondendo a toda a gama de cores comumente encontrada em conjuntos de estrelas.
- (c) Estrelas dos tipos B, A, F, G, K, M (a partir das observações diretas de espectros), e que esses tipos estão em concordância suficiente com o classes de cores para permitir o uso das considerações estatísticas comuns onde os espectros ainda não são conhecidos.

⁵Na versão final do artigo seguinte, Curtis qualificou sua aceitação do proposições anteriores de tal maneira que, em alguns detalhes numéricos, as comparações dadas abaixo não são mais aplicáveis com precisão aos seus argumentos; Acredito, porém, que as comparações contrastam corretamente a visão atual com aquela geralmente aceita alguns anos atrás.

- (d) Variáveis Cefeidas e de aglomerados que são certamente análogas a variáveis galácticas dos mesmos tipos, em espectro, mudança de cor, duração do período, quantidade de variação de luz e todos os caracteres de a curva de luz.
- (e) Variáveis irregulares, vermelhas, de pequeno alcance, do tipo Alpha Orionis, entre as estrelas mais brilhantes do aglomerado. Muitas estrelas vermelhas e amarelas com aproximadamente a mesma magnitude das estrelas azuis, em óbvia concordância com os fenômenos estelares gigantes do sistema galáctico, e claramente em desacordo com tudo o que sabemos sobre as relações de cor e magnitude das estrelas anãs.

5. Destas considerações preliminares destacamos duas deduções especiais.

Primeiro, um aglomerado globular é um “universo” bastante completo por si só, com fenômenos estelares típicos e representativos, incluindo diversas classes de estrelas que na vizinhança solar são reconhecidas como gigantes em luminosidade.

Em segundo lugar, estamos muito bem situados para o estudo de aglomerados distantes — mais externos do que internos. Assim obtemos uma visão dimensional abrangente, podemos determinar luminosidades reais relativas em vez de luminosidades aparentes relativas, e temos a vantagem distinta de que as estrelas mais luminosas são facilmente isoladas e as mais facilmente estudadas. Nenhuma das estrelas mais brilhantes de um aglomerado nos escapa. Se gigantes ou supergigantes existem, são necessariamente as estrelas que estudamos. Não podemos lidar legitimamente com o brilho médio das estrelas em aglomerados globulares porque os limites mais tênues estão aparentemente muito além do nosso poder dos telescópios atuais. Nossas fotografias comuns registram apenas os emissores mais poderosos — abrangendo uma faixa de apenas três ou quatro magnitudes no topo da escala de luminosidade absoluta, enquanto no domínio solar temos uma faixa extrema conhecida de 20 magnitudes em brilho absoluto e um intervalo geralmente estudado de doze magnitudes ou mais.

6. Vamos agora examinar algumas das condi-

ções que existiriam no aglomerado de Hércules (Messier 13) com base nos dois valores opostos para sua distância:

(a) As estrelas azuis.— As cores das estrelas têm sido reconhecidas há muito tempo como características dos tipos espectrais e como sendo de uma ajuda inestimável no estudo de estrelas fracas para as quais as observações espectroscópicas são difíceis ou impossíveis. O índice de cor, conforme usado em Mount Wilson, é a diferença entre as chamadas magnitudes fotográficas (pg) e fotovisuais (pv) — a diferença entre o brilho dos objetos em azul-violeta e em brilho amarelo-verde. Para um índice de cor negativo ($C.I. = pg. - pv. < 0,0$) as estrelas são chamadas de azuis e o tipo espectral correspondente é B; para estrelas amarelas, como o Sol (tipo G), o índice de cor é de cerca de $+0,8$ mag.; para estrelas mais vermelhas (tipos K, M), o índice de cor excede uma magnitude.

Um dos primeiros resultados do estudo fotográfico de Messier 13 em Mount Wilson foi a descoberta de um grande número de estrelas de índices de cor negativos. Resultados semelhantes foram obtidos posteriormente em outros aglomerados globulares e abertos, e entre as estrelas das nuvens galácticas. Naturalmente, esses índices de cores negativos em aglomerados foram considerados sem dúvidas para indicar estrelas do tipo B — uma suposição que mais tarde foi verificada espectroscopicamente com os refletores de Mount Wilson.⁶

A existência de estrelas do tipo B de magnitude 15 no aglomerado de Hércules parece responder decisivamente à questão da sua distância, porque as estrelas B na vizinhança solar são invariavelmente gigantes (mais de cem vezes mais brilhantes que o Sol, em média), e tal estrela gigante só pode parecer ter a magnitude 15 se estiver a mais de 30.000 anos-luz de distância.

Temos uma abundância de material sobre distâncias e magnitudes absolutas das centenas de estrelas tipo B vizinhas — existem medidas diretas de distância, bem como distâncias médias determinadas a partir de movimentos paraláti-

⁶Adams e van Maanen publicaram há vários anos as velocidades radiais e os tipos espectrais de um número de estrelas B no aglomerado duplo em Perseus, *Ast. Jour.*, Albany NY, 27, 1913 (187-188).

| | 36.000 anos-luz | 3.600 anos-luz, ou menos |
|---|--------------------|-----------------------------|
| a. Magnitude fotográfica absoluta média das estrelas azuis (<i>C.I.</i> < 0,0) | 0 | + 5 ou mais fraca |
| b. Magnitude fotográfica absoluta média dos aglomerados de estrelas | entre -1 e -2 | +3,2 ou mais fraca |
| c. Magnitude mediana absoluta fotovisual de Cefeidas de longo período | -2 | +3 ou mais fraca |
| d. Hipotético movimento próprio anual | 0'',004 | 0'',04, ou maior |

cos, de curvas de luminosidade observadas, de movimentos de correntes e de velocidades radiais combinadas com movimento adequado. Russell, Plummer, CharHer, Eddington, Kapteyn e outros trabalharam com essas estrelas com o resultado universal de considerá-las gigantes.

O estudo das estrelas B de Kapteyn é um dos clássicos da astronomia estelar moderna; seus métodos são principalmente os métodos bem experimentados, geralmente usados para estudos de estrelas próximas. Em suas várias listas, mais de setenta por cento de B são mais brilhantes que o zero absoluto da magnitude fotográfica,⁷ e apenas dois de 424 são mais fracas que +3. Este resultado deve ser comparado com o requisito acima mencionado de que as magnitudes absolutas das estrelas azuis em Messier 13 devem ser +5 ou mais fracas na média, se a distância do aglomerado for de 3.600 anos-luz ou menos, e não houver estrela no aglomerado mais brilhante que +3.

Pode ser levantada uma questão quanto à completude do material usado por Kapteyn e outros, pois se apenas as estrelas aparentemente brilhantes forem estudadas, as magnitudes absolutas médias podem ser demasiado elevadas. Kapteyn, no entanto, não tem dúvidas a este respeito, e uma investigação⁸ da distribuição de estrelas do tipo B, baseada no Catálogo Henry Draper, mostra que estrelas tipo B fracas não estão presentes na região de Orion estudada por Kapteyn.

O estudo em aglomerados locais parece estar

⁷Estrelas dos tipos B8 e B9 são habitualmente tratadas com o tipo A na discussão estatística; mesmo que sejam incluídos com os B's, 64 por cento das magnitudes absolutas de Kapteyn são mais brilhantes que zero e apenas 4 por cento são mais fracas que +2. Nenhuma estrela B8 ou B9 mais fracas que +3 estão nas lisas de Kapteyn.

⁸Shapley, H., *Processo Nat. Acad. Ciência*, 5, 1900 (434-440); um tratamento adicional deste problema aparecerá em uma próxima contribuição de Mount Wilson.

praticamente completo sem revelar nenhuma estrela B como fraca, com +5. Mas se o aglomerado de Hércules não estivesse a mais de 3.600 anos-luz de distância, suas estrelas B seriam tão fracas quanto o Sol, e a uniformidade admitida em todo o sistema galáctico (Proposição C) seria contestada: pois embora perto da Terra, seja em aglomerados ou não, as estrelas B são gigantes, longe da Terra em todas as direções, seja nas nuvens da Via Láctea ou em aglomerados, seriam anãs - e a teoria antropocêntrica poderia voltar a ganhar ânimo.

Vamos enfatizar novamente que as estrelas azuis próximas e distantes que estamos comparando são todas estrelas de aglomerados, e que parece não haver nenhuma quebra acentuada na gradação dos aglomerados, seja no conteúdo total ou na distância, dese Orion, os aglomerados abertos fracos até Messier 13.

(b) A magnitude máxima absoluta das estrelas do aglomerado. — Em vários grupos e aglomerados próximos, o brilho fotográfico absoluto máximo, determinado a partir de medidas diretas de paralaxe ou movimento de fluxo ou de ambos, é conhecido por exceder os seguintes valores:

| | M |
|------------------------------------|------|
| Sistema de Ursa Maior | -1,0 |
| Aglomerado em movimento em Perseus | -0,5 |
| Híades | +1,0 |
| Aglomerado de Scorpio-Centaurus | -2,5 |
| Aglomerado da Nebulosa de Órion | -2,5 |
| Plêiades | -1,0 |
| Grupo 61 Cygni ⁹ | +1,0 |

Nenhum grupo físico próximo é conhecido, com a possível exceção de 61 Cygni, na qual as estrelas mais brilhantes são mais fracas do que +1,0. A

média M da lista de clusters acima é $-0,8$; ainda assim, para todos os grupos físicos distantes, deve ser $+3$ ou menos (não resistindo à certa existência dentro deles de Variáveis Cefeidas e estrelas do tipo B), se a distância de Messier 13 for 3.600 luz-anos ou menos. Mesmo que a distância seja de 8.000 anos-luz, como disse Curtis sugere no artigo a seguir, a média M precisaria ser $+1,4$ ou mais fraca — um valor ainda inconciliável com observações sobre aglomerados próximos.

A exigência de que as estrelas brilhantes em um aglomerado globular devem ser no máximo apenas duas magnitudes mais brilhantes que nosso Sol equivale a dizer que em Messier 13 não há um verdadeiro gigante entre suas trinta ou mais mil estrelas. Isso é essencialmente equivalente, à luz da Proposição B, a sustentar que dos dois ou três milhões de estrelas em aglomerados distantes (cerca de meio milhão dessas estrelas foram realmente fotografadas), não há nenhuma estrela gigante mais brilhante que a magnitude fotográfica absoluta $+2$. E acabamos de ver que as medidas diretas mostram que todos os nossos aglomerados próximos contêm tais gigantes; na verdade alguns aparecem ser composto principalmente por gigantes.

Como mais um teste das distâncias dos aglomerados globulares, um dispositivo especial foi usado com o refletor Hooker. Com um fino prisma colocado no feixe convergente pouco antes do foco, podemos fotografar, para uma estrela (ou para cada grupo de estrelas), um pequeno espectro que se estende não apenas pela região azul normalmente fotografada, mas também em todo o amarelo e vermelho. Usando placas fotográficas especialmente preparadas, sensíveis ao azul e vermelho, mas relativamente insensível no verde-amarelo, o pequeno espectro é dividido ao meio, e a intensidade relativa do azul e partes vermelhas depende, como é bem conhecido, do tipo espectral e magnitude absoluta; gigantes e anãs, do mesmo tipo no sistema de classificação espectral de Harvard, mostram diferenças marcantes nos espectros. Os tipos espectrais de quarenta ou cinquenta estrelas mais brilhantes no aglomerado de Hércules são conhecidos, classificados como de costume com base nas linhas espectrais. Usando o dispositivo descrito acima, uma série de essas estrelas foram fotografadas colocando lado a lado na mesma placa gigantes e anãs bem conhecidas

da vizinhança solar para quais distâncias e magnitudes absolutas são determinadas por medidas diretas de paralaxe. Com base na distância menor para Messier 13, os espectros desses aglomerados de estrelas (sendo então de magnitude absoluta mais fracas que $+4$) devem assemelhar-se aos espectros das anãs. Mas as placas mostram claramente que em brilho absoluto o aglomerado estrelas iguais, e em muitos casos até superiores, às gigantes — um resultado esperado se a distância for da ordem de 36.000 anos-luz.

O procedimento acima é uma variação do método usado por Adams e seus associados em estrelas mais brilhantes onde suficiente dispersão pode ser obtida para permitir intercomparação fotométrica de linhas espectrais sensíveis. Na medida em que foi aplicado a aglomerados, o método espectroscópico usual condiz com as conclusões acima de que as estrelas vermelhas e amarelas brilhantes nos aglomerados são gigantes.

Um argumento muito repetido por Curtis é que a média da magnitude absoluta das estrelas ao redor do Sol é igual ou mais fraca do que o brilho solar, portanto, as estrelas médias que vemos em aglomerados também são anãs. Ou, dito de outra forma, ele argumenta que desde a classe espectral média de um aglomerado globular é do tipo solar e a estrela média do tipo solar perto do Sol tem luminosidade solar, as estrelas fotografadas em aglomerados globulares devem ter luminosidade solar, portanto, não distante. Esta dedução, afirma ele, está em conformidade com a proposição C — uniformidade em todo o universo. Mas ao tirar as conclusões, Curtis aparentemente ignora, primeiro, a existência muito comum de estrelas gigantes vermelhas e amarelas em sistemas estelares e, em segundo lugar, a circunstância mencionada acima na Seção 5 que, ao tratar um sistema externo distante, naturalmente observamos primeiro suas estrelas gigantes. Se o material não for mutuamente extensivo no domínio solar e no aglomerado remoto (e certamente não o é para todos os tipos de estrelas), então a comparação das médias significa praticamente nada por causa da seleção óbvia e vital de estrelas mais brilhantes no aglomerado. A comparação deve ser aglomerado próximo com aglomerado distante, ou das luminosidades dos mesmos tipos de estrelas nos dois lugares.

Suponha que um observador, confinado a uma

pequena área de um vale, tenta medir as distâncias dos picos das montanhas circundantes. Por causa da linha de base curta que lhe permitiu fazer medidas, seu cálculo trigonométrico de paralaxes não tem valor, exceto para as colinas próximas. Nos picos remotos, no entanto, seu telescópio mostra folhagem verde. Primeiro ele assume uniformidade botânica aproximada em todas as áreas visíveis território. Então ele descobre que a altura média de todas as plantas imediatamente ao seu redor (coníferas, palmeiras, ásteres, trevos, etc.) é um pé. Correlacionando esta média com a medida angular altura das plantas visíveis contra a linha do horizonte nos picos distantes ele obtém valores das distâncias. Se, no entanto, ele tivesse comparado a folhagem nas colinas próximas, para as quais há medidas trigonométrica, com a dos picos remotos, ou usou algum método de distinção vários tipos florais, ele não teria confundido pinheiros com ásteres obtido resultados errados para as distâncias da superfície contornando montanhas. Todos os princípios envolvidos no paralaxe botânico do pico de uma montanha têm seus análogos na paralaxe fotométrica de um aglomerado globular.

(c) Variáveis Cefeidas. — Estrelas gigantes de outra classe, as Variáveis Cefeidas têm sido amplamente utilizadas na exploração de grandes aglomerados. Depois de determinar o período de uma Cefeida, sua magnitude absoluta é facilmente encontrada a partir da curva de período-luminosidade derivada das observações e a distância de qualquer aglomerado é então obtida a partir da medida da magnitude aparente. Cefeidas Galácticas e Cefeidas de aglomerados são estritamente comparáveis pela Proposição C — uma dedução que é amplamente apoiada por observações em Mount Wilson e Harvard, da cor, espectro, curvas de luz e brilho relativos a outros tipos de estrelas.

Curtis baseia suas objeções mais fortes a uma dimensão maior da galáxia pelo o uso que fez das variáveis Cefeidas, questionando a suficiência dos dados e precisão dos métodos envolvidos. Mas acredito que na presente edição há pouco sentido em analisar os detalhes das Cefeidas pois esses detalhes, se quisermos, são qualitativamente bastante independentes na determinação da escala de sistema galáctico, e são apenas resultados qualitativos que estão agora em causa. Poderíamos

descartar completamente as Cefeidas e usar em seu lugar ou as estrelas gigantes vermelhas e métodos espectroscópicos, ou as centenas de estrelas do tipo B sobre as quais os astrônomos estelares mais capazes trabalharam durante anos e encontraram praticamente a mesma distância para o aglomerado Hércules e para outros aglomerados, e obtiveram resultados dimensões frequentemente semelhantes para o sistema galáctico. Na verdade, fundamentar os resultados destas outras fontes fortalece nossa crença nas suposições e métodos envolvidos no uso das variáveis Cefeidas.

Como as distâncias dos aglomerados são dadas pelas variáveis Cefeidas estão qualitativamente em excelente concordância com as distâncias correspondentes dadas pelas estrelas azuis e pelas gigantes amarelas e vermelhas, discutidas nas subseções anteriores, aqui me referirei apenas brevemente aos quatro pontos relacionados ao problema das Cefeidas, primeiro observando que se as distâncias dos aglomerados devem ser divididas por 10 ou 15, o mesmo divisor também deve ser usado para as distâncias derivadas para as Cefeidas galácticas.

(1) A magnitude absoluta média das Cefeidas típicas, de acordo com minha discussão sobre movimentos próprios e correlações de magnitude, é de cerca de $-2,5$. O material sobre movimento próprio também foi discutido independentemente por Russell, Hertzsprung, Kapteyn, Stromberg e Scares. Todos eles aceitam a validade do método, e concordamos em tornar a magnitude média absoluta praticamente a mesma que eu derivo. Scares constata, aliás, a partir de uma discussão de erros prováveis e de possíveis erros sistemáticos, que o os movimentos observados são inconciliáveis com um brilho absoluto cinco magnitudes mais fracas, porque nesse caso o movimento médio paralático das Cefeidas mais brilhantes seria da ordem de $0",160$ em vez de $0",016 \pm 0",002$ conforme observado.

As paralaxes trigonométricas e espectroscópicas da Cefeidas galácticas, até onde foram determinadas, concordam com os valores fotométricos em ambientes que exigem alta luminosidade; os métodos espectroscópicos e fotométricos não são totalmente independentes, uma vez que para ambos o ponto zero depende do movimento paralático.

(2) Quando o movimento paralático é usado

para inferir magnitudes absolutas para estrelas individuais (um processo possível apenas quando movimentos peculiares são pequenos e as observações muito boas), as Cefeidas galácticas mais brilhantes indicam uma correlação entre luminosidade e período.¹⁰ A necessidade, no entanto, de negligenciar movimento peculiar individual e erros de observação para este procedimento faz com que a correlação pareça muito menos clara para as Cefeidas galácticas do que para aqueles de sistemas externos (onde os movimentos próprios não são relevantes), e pouca importância poderia ser dada a a curva período-luminosidade se fosse baseada apenas nas Cefeidas locais. Quando os dados adicionais mencionados abaixo também forem tratados desta forma, a correlação é praticamente obscurecida para as Cefeidas galácticas, por causa dos maiores erros de observação.

Por conta da uniformidade provavelmente universal do fenômeno das Cefeidas, no entanto, precisamos conhecer apenas a média paralática do movimento das Cefeidas galácticas para determinar o ponto zero de a curva no que se baseia nas Cefeidas externas; e os movimentos individuais não entram no problema, exceto, como observado acima, para indicar provisoriamente a existência da relação período-luminosidade. É apenas esse movimento paralático médio que outros investigadores usaram para mostrar a luminosidade extremamente alta das Cefeidas. Minhas magnitudes e distâncias absolutas adotadas para todas essas estrelas foram baseadas no período final da curva de luminosidade, e não em movimentos individuais.

(3) Através da gentileza do Professor Boss e do Sr. Roy de Observatório Dudley, foram apresentadas os movimentos próprios para 21 Cefeidas além das 13 da Catálogo Preliminar Geral. O novo material é de relevância relativamente baixa, mas a discussão não publicada por Stromberg daquela parte referente a as estrelas do norte não introduzem nenhuma mudança relevante no resultado para o brilho médio absoluto das Cefeidas.

¹⁰Senhor. Scares chamou minha atenção para um erro na plotagem do cálculo provisório suavizado magnitudes absolutas contra o período logarítmico para as Cefeidas discutidas em Monte Wilson Contribution nº 151. A curva preliminar para as Cefeidas galácticas é mais íngreme do que que as da Pequena Nuvem de Magalhães, Omega Centauri e outros aglomerados.

| | | |
|--------------------------|---------------|-----------------------|
| Paralaxe fotométrico | 0',3 | (Shapley) |
| Paralaxe trigonométrico | 0,006 ± 0,006 | (van Maanen) |
| Paralaxe espectroscópico | 0,004 | (Adams, Joy, Burwell) |

Deve-se notar que as 18 pseudo-Cefeidas discutidas por Adams e Joy¹¹ são, sem exceção, extremamente brilhantes (absolutamente magnitudes variando de - 1 a - 4); eles são completamente comparáveis com as Cefeidas comuns na distribuição galáctica, nas características espectrais e movimento.

(4) A partir de resultados, não publicados, gentilmente comunicados por van Maanen e por Adams, temos a seguinte verificação do grande distância e alta luminosidade das importantes, de alta velocidade Cefeidas RR Lyra do tipo aglomerado:

O grande movimento próprio desta estrela, 0"25 anual, levou Hertzsprung há alguns anos a suspeitar que a estrela não está distante, e que ele e seus numerosos congêneres em aglomerados são anões. O grande movimento próprio, no entanto, indica alta velocidade real, em vez de proximidade, como mostram os resultados acima. Mais recentemente, Hertzsprung reconsiderou o problema e, usando as variáveis do aglomerado, derivou uma distância do aglomerado globular Messier 3 em concordância essencial com meu valor.

(d) Movimento próprio anual hipotético. – A ausência movimento próprio observável para aglomerados distantes deve ser uma indicação de sua grande distância por causa das altas velocidades conhecidas na linha de visada. A velocidade radial média dos aglomerados globulares parece ser de cerca de 150 km/s. Assumindo, como sempre, uma distribuição aleatória de velocidades, os movimentos transversais de Messier 13 e de aglomerados globulares brilhantes semelhantes devem ser maiores do que os valores bastante apreciáveis de 0,04 por ano se a distância for inferior a 3,600 anos-luz. Nenhum movimento próprio foi encontrado para aglomerados distantes; A Lundmark analisou este assunto especialmente para

¹¹Adams, W. S. e A. H. Joy, Publ. Ast. Soc. Pac., San Francisco, Calif., 31, 1919 (184-186).

cinco sistemas e concluiu que o movimento próprio anual é menor que $0''01$.

7. Vamos resumir alguns dos resultados que levam à aceitação de uma escala restrita do sistema galáctico.

Se as distâncias dos aglomerados globulares devem ser diminuídas para um décimo, o poder de emissão de luz de suas estrelas pode ser apenas um centésimo das estrelas de aglomerados locais do mesmo espectro e tipos fotométricos. Como consequência, acredito que o texto esclarecedor de Russell sobre a teoria da evolução espectral teria que ser largamente abandonado, e a brilhante teoria de Eddington sobre estrelas gigantes gasosas precisaria ser grandemente modificada ou totalmente abandonada. Agora ambos as teorias modernas têm sua justificativa, primeiro, na natureza de seus conceitos e postulados e, em segundo lugar, em seu grande sucesso em ajustar fatos observacionais.

Da mesma forma, a lei do período-luminosidade da variação das Cefeidas seria sem sentido; As pesquisas de Kapteyn sobre a estrutura do aglomerado local precisaria de nova interpretação, porque suas leis sobre a luminosidade poderiam ser aplicadas localmente, mas não de forma geral; e uma perda para a astronomia seria a da generalidade dos métodos espectroscópicos para determinar distâncias estelares, pois isso significaria que características espectrais idênticas indicam estrelas com brilhos diferentes em 100 para 1, dependendo apenas se a estrela está na vizinhança solar ou em um aglomerado distante.

2 As dimensões e a configuração do sistema galáctico

Quando aceitamos a visão de que a distância do aglomerado de Hércules é tal que seus fenômenos estelares estão em harmonia com fenômenos estelares locais — suas estrelas mais brilhantes são gigantes típicas, suas Cefeidas comparáveis às nossas — então segue-se que aglomerados globulares mais fracos e menores ainda estão mais distantes do que 36.000 pontos-luz anos. Um terço dos aglomerados agora conhecidos estão mais distantes do que 100.000 anos-luz; o mais distante tem

mais de 200.000 luz- anos de distância, e o diâmetro de todo o sistema de aglomerados globulares tem cerca de 300.000 anos-luz.

Como a afiliação dos aglomerados globulares à galáxia é mostrado pela sua concentração no plano da Via Láctea e seu arranjo simétrico em relação a ele, também segue que o sistema galáctico de estrelas é tão grande quanto esta parte subordinada. Durante o ano passado, encontramos variáveis Cefeidas e outras estrelas de alta luminosidade entre as estrelas de décima quinta magnitude das nuvens galácticas; isso só pode significar que algumas partes das nuvens estão mais distantes do que o aglomerado de Hércules. Isto parece ser uma boa razão, portanto, para acreditar que regiões isoladas do sistema galáctico povoadas por estrelas estendem-se pelo menos até o aglomerados globulares.

Uma consequência de aceitar a teoria de que os aglomerados descrevem a forma e a extensão do sistema galáctico, é que o Sol se encontra muito distante do centro da galáxia. É apropriado admitir que não estamos longe do centro de um grande aglomerado ou nuvem local, mas essa nuvem está a pelo menos 50.000 anos-luz do centro galáctico. Há vinte anos, Newcomb observou que o o Sol parece estar no plano galáctico porque a Via Láctea é um grande círculo — uma faixa envolvente de luz — e que o Sol também aparece perto do centro do universo porque a densidade de estrelas diminui com a distância em todas as direções. Mas ele conclui do seguinte modo:

Ptolomeu mostrou por meio de evidências que, do seu ponto de vista, pareciam tão tão sólidas quanto o que citamos, que a Terra estava fixada no centro do universo. Não podemos ser vítimas de alguma falácia, como ele foi?

A nossa presente resposta à pergunta de Newcomb é que temos estado vítimas de métodos restritos de medição de distância e da posição do Sol perto do centro de um sistema subordinado; fomos induzidos em erro, pelos fenômenos relacionados, a pensarmos que estamos no centro das coisas. Praticamente do mesma maneira como o homem antigo foi enganado pela rotação da Terra, com o conseqüente fenômeno movimento diário aparente de todos os corpos celestes ao redor da Terra, acreditando que até mesmo seu pequeno planeta estava o centro do universo, e que seus deuses terrestres criaram e julgaram tudo.

Se o homem tivesse alcançado a sua atual posição intelectual num período geológico posterior, ele poderia não ter sido levado a esses vãos conceitos a respeito de sua posição no universo físico, pois o sistema solar está se afastando rapidamente do plano galáctico e está se movendo para longe do centro do aglomerado local. Se esse movimento permanecer inalterado em direção e quantidade, em cem milhões de anos ou então a Via Láctea será bem diferente de uma faixa circundante de nuvens estelares, o aglomerado local será um objeto distante, e a densidade das estrelas não diminuirá mais em todas as direções com a distância do Sol.

Outra consequência da conclusão de que o sistema galáctico tem um diâmetro da ordem de 300.000 anos-luz, é a dificuldade mencionada anteriormente que resulta da teoria das "galáxia comparáveis" relativas às nebulosas espirais. Não farei uma descrição e discussão deste discutível problema. Uma vez que a teoria provavelmente permanece ou cai junto com a hipótese de um pequeno sistema galáctico, não faz muito sentido discutir outro material sobre o assunto, especialmente tendo em vista as rotações recentemente medidas de nebulosas espirais que parecem fatais para tal interpretação.

Parece-me que as provas, para além dos testes reconhecidamente críticos dependendo do tamanho da galáxia, se opõem à visão que as espirais são galáxias de estrelas comparáveis com a nossa.

Na verdade, não parece ainda haver razão para alterar a hipótese provisória de que as espirais não são compostas de estrelas, mas são objetos verdadeiramente nebulosos. Três resultados muito recentes são, acredito, claramente severos para a teoria de que as nebulosas espirais são galáxias comparáveis — (1) A dedução de Scares de que nenhuma das nebulosas espirais conhecidas tem um brilho superficial tão pequeno quanto o da nossa galáxia; (2) O estudo de Reynold sobre a distribuição de luz e cor em espirais típicas, das quais ele conclui que não podem ser sistemas estelares; e (3) as recentes medidas de van Maanen de rotação na espiral M 33, corroborando seu trabalho anterior sobre Messier 101 e 81, e indicando que estas espirais brilhantes não podem razoavelmente ser os objetos excessivamente distantes como exigido pela teoria.

Mas mesmo que as espirais não sejam sistemas galácticos, podem haver no espaço sideral outros sistemas estelares iguais ou maiores que o nosso — como ainda não reconhecido e possivelmente muito além do poder dos existentes dispositivos ópticos e das presentes escalas de medição. Os telescópios modernos, com acessórios como espectroscópios de alta potência e intensificadores fotográficos, destinam-se a ampliar as investigações em relação ao tamanho do universo muito mais longe no espaço, e contribuir ainda mais para o problema da existência de outras galáxias.

A escala do Universo – Parte II

Heber D. Curtis

Diretor, Allegheny Observatory

Dimensões e estrutura da galáxia

Definição das unidades utilizadas. — A distância percorrida pela luz num ano, $9,5 \times 10^{12}$ km, ou quase seis trilhões de milhas, conhecida como ano-luz, tem sido usada há cerca de dois séculos como meio de visualizar as distâncias estelares e constitui uma unidade conveniente e de fácil compreensão. Ao longo deste documento, as distâncias das estrelas serão expressas em anos-luz.

A magnitude absoluta de uma estrela é frequentemente necessária para que possamos comparar as luminosidades de diferentes estrelas em termos de uma unidade comum. É a magnitude aparente que a estrela teria se fosse observada a partir da distância padrão de 32,6 anos-luz (correspondente a uma paralaxe de $0''1$).

Conhecendo a paralaxe, ou a distância, de uma estrela, a magnitude absoluta pode ser calculada a partir de uma das equações simples:

$$\text{Magnitude Absoluta} = \text{Magnitude Aparente} + 5 + 5 \times \log(\text{paralaxe em arcoseg})$$

$$\text{Magnitude Absoluta} = \text{Magnitude Aparente} + 7,6 - 5 \times \log(\text{distância em anos-luz})$$

Limitações nos estudos das dimensões galácticas. — Por métodos diretos, as distâncias de estrelas individuais podem ser determinadas com considerável precisão até uma distância de cerca de duzentos anos-luz.

A uma distância de trezentos anos-luz (28×10^{14} km) o raio da órbita da Terra ($1,5 \times 10^8$ km) subtende um ângulo ligeiramente superior a $0''01$, e o erro provável das melhores determinações modernas de paralaxe fotográfica ainda não foi reduzido materialmente abaixo deste valor. O método espectroscópico de determinação das distâncias estelares através da magnitude absoluta tem provavelmente, atualmente, as mesmas limitações

que o método trigonométrico, do qual o método espectroscópico depende para a sua escala absoluta.

Foram utilizados vários métodos indiretos que alargam um pouco mais o nosso alcance no espaço para determinar as distâncias médias de grandes grupos ou classes de estrelas, mas não dão qualquer informação sobre as distâncias individuais das estrelas do grupo ou classe. Entre esses métodos, podem ser assinaladas como mais importantes as várias correlações que foram feitas entre os movimentos próprios das estrelas e o movimento paralático devido à velocidade do nosso Sol no espaço, ou entre os movimentos próprios e as velocidades radiais das estrelas.

As limitações de tais métodos de correlação dependem, atualmente, do fato de se conhecerem movimentos próprios precisos, em geral, apenas para as estrelas mais brilhantes. Um movimento de 20 km/segundo através da nossa linha de visada produzirá os seguintes movimentos próprios anuais:

| | | | |
|----------------------|---------|---------|---------|
| distância (anos-luz) | 100 | 500 | 1,000 |
| mov. prop. anual | $0''14$ | $0''03$ | $0''01$ |

O erro médio provável dos movimentos próprios de Boss é de cerca de $0''006$. Tais métodos de correlação não são, além disso, uma simples questão de comparação de valores, mas tornam-se difíceis e, em certa medida, incertos devido às complexidades intrigantes trazidas pela variação dos movimentos espaciais das estrelas com o tipo espectral, a massa estelar (?), a luminosidade estelar (?) e fatores de comunidade ainda imperfeitamente conhecidos de arraste de estrelas.

Será então evidente que o padrão base disponível em estudos das regiões mais distantes da nossa galáxia é lamentavelmente curta, e que em tais estudos temos de depender largamente de investigações da distribuição e da frequência de ocorrência

de estrelas de diferentes magnitudes aparentes e tipos espectrais, no pressuposto de que as estrelas mais distantes, quando consideradas em grande número, terão uma média aproximadamente igual à das estrelas mais próximas conhecidas. Esta hipótese é razoável, embora não necessariamente correta, uma vez que temos pouco conhecimento certo de regiões galácticas tão distantes como quinhentos anos-luz.

Se todas as estrelas tivessem aproximadamente a mesma magnitude absoluta, ou se isto fosse verdade mesmo para as estrelas de qualquer tipo ou classe particular, o problema de determinar a ordem geral das dimensões da nossa galáxia seria comparativamente fácil.

Mas o problema se torna mais complicado pelo fato de, considerando as estrelas de todos os tipos espectrais, a dispersão da luminosidade absoluta ser muito grande. Mesmo com a exclusão de um pequeno número de estrelas excepcionalmente brilhantes ou tênues, esta dispersão atinge provavelmente dez magnitudes absolutas, o que corresponderia a uma incerteza cem vezes maior na distância de uma dada estrela. No entanto, veremos mais adiante que possuímos informação razoavelmente certa da magnitude absoluta média das estrelas dos diferentes tipos espectrais.

Dimensões da nossa galáxia. — Os estudos da distribuição das estrelas e da relação entre o número de estrelas de magnitudes aparentes sucessivas levaram vários investigadores a postular dimensões bastante concordantes para a galáxia; podem citar-se alguns:

Wolf; cerca de 14,000 anos-luz de diâmetro
 Eddington; cerca de 15,000 anos-luz
 Shapley (1915); cerca de 20,000 anos-luz
 Newcomb; não menos que 7,000 anos-luz;
 depois- talvez 30,000 anos-luz de diâmetro
 e 5,000 anos-luz de espessura.
 Kapteyn; cerca de 60,000 anos-luz.

Estrutura geral da galáxia. — A partir das linhas de investigação acima mencionadas, tem havido um acordo geral semelhante nos resultados deduzidos quanto à forma e estrutura da galáxia:

1. As estrelas não são infinitas em número, nem uniformes em distribuição.
2. A nossa galáxia, delimitada para nós pelos

contornos projetados da Via Láctea, contém possivelmente bilhões de sóis.

3. Esta galáxia tem a forma de uma lente ou de um relógio fino, cuja espessura é provavelmente inferior a um sexto do diâmetro.

4. O nosso Sol está situado razoavelmente próximo da região central da galáxia.

5. As estrelas não estão distribuídas uniformemente pela galáxia. Uma grande parte está provavelmente dentro da estrutura anelar sugerida pela aparência da Via Láctea, ou está disposta em regiões grandes e irregulares de maior densidade estelar. O autor considera que a Via Láctea é, pelo menos, tanto um efeito estrutural como um efeito de profundidade. Foi sugerida uma estrutura em espiral para a nossa galáxia; a evidência de tal estrutura em espiral não é muito forte, exceto quando pode ser apoiada pela analogia das espirais como universos insulares, mas tal estrutura não é impossível nem improvável. A posição do nosso Sol perto da região central da galáxia não é favorável para a determinação precisa da estrutura galáctica atual.

Relativa escassez dos tipos galácticos. — Apenas o tamanho não implica necessariamente complexidade; é um facto notável que, numa galáxia de mil milhões de objetos, observamos, não dez mil tipos diferentes, mas talvez não mais de cinco classes principais, para além dos fenómenos menores do nosso próprio sistema solar.

1. As estrelas. — A primeira e mais importante classe é formada pelas estrelas. De acordo com o tipo de espectro exibido, podemos dividir as estrelas em cerca de oito ou dez tipos principais; mesmo quando incluímos as gradações internas consecutivas dentro dessas classes espectrais, é duvidoso que os métodos atuais nos permitam distinguir até cem subdivisões separadas no total. As velocidades espaciais médias variam de 10 a 30 km/s, havendo um aumento bem marcado na velocidade espacial média à medida que se passa das estrelas azuis para as mais vermelhas.

2. Os aglomerados globulares de estrelas são agregações muito condensadas de dez mil a cem mil estrelas. Talvez uma centena seja conhecida. Embora bastante irregulares no agrupa-

mento, são geralmente consideradas como definitivamente galácticas na distribuição. As velocidades espaciais são da ordem dos 300 km/s.

3. As nebulosas difusas são massas enormes, ténues, semelhantes a nuvens; razoavelmente numerosas; sempre de distribuição galáctica. Mostram frequentemente um espectro gasoso, embora muitas concordem aproximadamente no espectro com as suas estrelas relacionadas. As velocidades espaciais são muito baixas.

4. As nebulosas planetárias são pequenas, redondas ou ovais, e quase sempre com uma estrela central. São conhecidas menos de cento e cinquenta. A sua distribuição é galáctica; o espectro é gasoso; as velocidades espaciais são de cerca de 80 km/s.

5. As espirais. — Talvez um milhão estejam ao alcance de grandes refletores; o espectro é geralmente como o de um aglomerado de estrelas. São enfaticamente não galácticas em distribuição, agrupadas em torno dos pólos galácticos, com forma espiralada. As velocidades espaciais são da ordem dos 1200 km/s.

Distribuição dos tipos celestes.— Com uma, e apenas uma, exceção, todos os tipos de objetos celestes conhecidos mostram uma tal distribuição em relação ao plano da nossa Via Láctea, que não pode haver qualquer dúvida razoável de que todas as classes, exceto esta, são membros integrantes da nossa galáxia. Vemos que todas as estrelas, sejam elas médias, binárias, variáveis ou temporárias, mesmo os tipos mais raros, mostram esta concentração inconfundível em direção ao plano galáctico. O mesmo se passa com as nebulosas difusas e planetárias e, embora de forma um pouco menos definida, com os aglomerados globulares de estrelas.

A única exceção é formada pelas espirais; agrupadas em torno dos pólos da nossa galáxia, parecem abominar as regiões de maior densidade estelar. Parecem ser claramente uma classe à parte. Nunca encontradas na nossa Via Láctea, não há outra classe de objetos celestes com as suas características distintivas de forma, distribuição e velocidade no espaço.

A evidência atualmente disponível aponta fortemente para a conclusão de que as espirais são

galáxias individuais, ou universos insulares, comparáveis à nossa própria galáxia em dimensões e em número de unidades de componentes. Embora a teoria do universo-ilha das espirais não seja um postulado vital numa teoria das dimensões galácticas, no entanto, devido à sua relação indireta com a questão, os argumentos a favor da hipótese do universo-ilha serão incluídos nos que tocam mais diretamente nas dimensões prováveis da nossa própria galáxia.

Outras teorias das dimensões galácticas.— A partir de provas que serão referidas mais adiante, o Dr. Shapley deduziu distâncias muito grandes para os aglomerados globulares de estrelas, e sustenta que a nossa galáxia tem um diâmetro comparável às distâncias que ele deduziu para os aglomerados, a saber, — um diâmetro galáctico de cerca de 300.000 anos-luz, ou pelo menos dez vezes maior do que o anteriormente aceito. Os postulados das duas teorias podem ser delineados da seguinte forma:

Teoria atual:

A nossa galáxia não deve ter mais de 30.000 anos-luz de diâmetro, e talvez 5.000 anos-luz de espessura. Os aglomerados, e todos os outros tipos de objetos celestes, exceto as espirais, são partes componentes do nosso próprio sistema galáctico. As espirais são uma classe à parte, e não objetos intergalácticos. Como universos-ilha, da mesma ordem de grandeza da nossa galáxia, estão distantes de nós 500.000 a 10.000.000, ou mais, anos-luz.

Teoria de Shapley:

A galáxia tem aproximadamente 300.000 anos-luz de diâmetro e 30.000, ou mais, anos-luz de espessura. Os aglomerados globulares são objetos remotos, mas fazem parte da nossa própria galáxia. O aglomerado mais distante está situado a cerca de 220.000 anos-luz de distância. As espirais são provavelmente de constituição nebulosa, e possivelmente não são membros da nossa própria galáxia, afastadas de alguma forma das regiões de maior densidade estelar.

Evidência fornecida pela magnitude das estrelas

A estrela "média".- Será vantajoso considerar as duas teorias das dimensões galácticas do ponto

de vista da estrela média. Qual é o tipo "médio" ou mais frequente de estrela da nossa galáxia ou de um aglomerado globular de estrelas, e se pudermos com alguma probabilidade postular uma tal estrela média, que influência terão as características dessa estrela na questão da sua distância média de nós?

Não há provas adequadas de que as estrelas mais distantes da nossa galáxia sejam de algum modo essencialmente diferentes das estrelas com distância conhecida mais próxima de nós. Parece então que podemos seguramente fazer tais correlações entre as estrelas mais próximas e as mais distantes, tomadas como um grupo. Em tais comparações, as limitações do tipo espectral devem ser observadas tão rigorosamente quanto possível, e os resultados baseados em pequenos números de estrelas devem ser evitados, se possível.

Muitas investigações, com destaque para os estudos de Shapley sobre as cores das estrelas nos aglomerados globulares e os espectros integrados destes objetos e da Via Láctea feitos por Fath, indicam que a estrela média de um aglomerado estelar ou da Via Láctea será, na grande maioria dos casos, algo semelhante ao nosso Sol em termos de tipo espectral, ou seja, essa estrela média estará, em geral, entre os tipos espectrais F e K.

Características das estrelas do tipo F-K de distância conhecida. — As distâncias das estrelas do tipo F-K na nossa própria vizinhança foram determinadas em maior número, talvez, do que para as estrelas de qualquer outro tipo espectral, de modo que a magnitude absoluta média das estrelas deste tipo parece razoavelmente bem determinada. Há todas as razões para acreditar, contudo, que a nossa seleção de estrelas deste ou de outros tipos para determinações diretas de distâncias não tem sido representativa. Os nossos programas de paralaxes têm uma tendência para selecionar estrelas de grande luminosidade ou de grande velocidade espacial.

Os valores de Kapteyn para as magnitudes absolutas médias das estrelas dos vários tipos espectrais são os seguintes:

A curva de luminosidade-frequência mais recente do mesmo investigador coloca o máximo de frequência das estrelas em geral, considerando todos os tipos espectrais em conjunto, na magnitude absoluta +7,7.

| Tipo | Média Mag. Abs. |
|------|-----------------|
| B5 | + 1.6 |
| A5 | +3.4 |
| F5 | + 7 |
| G5 | + 10 |
| K5 | + 13 |
| M | + 15 |

Uma tabulação recente de cerca de quinhentas paralaxes modernas determinadas fotograficamente coloca a magnitude absoluta média das estrelas do tipo F-K em cerca de +4,5.

A magnitude absoluta média de quinhentas estrelas dos tipos espectrais F a M é próxima de +4, conforme determinado espectroscopicamente por Adams.

Parece certo que os dois últimos valores da magnitude absoluta média são demasiado baixos, isto é, indicam uma luminosidade média demasiada elevada, devido à omissão nos nossos programas de paralaxe das estrelas intrinsecamente mais fracas. As magnitudes absolutas das estrelas anãs são, em geral, determinadas com acurácia razoável; as magnitudes absolutas de muitas das estrelas gigantes dependem de paralaxes pequenas e incertas. Tendo em conta estes fatos, podemos considerar provisoriamente que a magnitude absoluta média das estrelas F-K de distância conhecida não é mais brilhante do que +6; alguns investigadores preferem um valor de +7 ou +8.

Comparação das estrelas da Via Láctea com as estrelas "médias".- Podemos tomar, sem erro grave, as distâncias de 10.000 e 100.000 anos-luz respectivamente, como representando a distância nas duas teorias do nosso ponto no espaço à linha central da estrutura da Via Láctea. Pode então ser elaborado o seguinte quadro sucinto:

| Magnitude aparente | Magnitude absoluta correspondente para distância de, - | |
|--------------------|--|------------------|
| | 10.000 anos-luz | 100.000 anos-luz |
| 10 | -2,4 | -7,4 |
| 12 | -0,4 | -5,4 |
| 14 | +1,6 | -3,4 |
| 16 | +3,6 | -1,4 |
| 18 | +5,6 | +0,6 |
| 20 | +7,6 | +2,6 |

Ver-se-á pela tabela acima que as estrelas de magnitudes aparentes 16 a 20, observadas na nossa estrutura da Via Láctea em tão grande número e, pelos seus espectros, que se crê serem predominantemente de tipo F-K, são essencialmente da mesma luminosidade absoluta que as estrelas conhecidas mais próximas destes tipos, se se assumir que estão à distância média de 10.000 anos-luz. O valor mais elevado postulado para as dimensões galácticas exige, por outro lado, uma proporção enorme de estrelas gigantes.

Proporção de estrelas gigantes entre as estrelas de distância conhecida. — Todas as evidências existentes indicam que a proporção de estrelas gigantes numa dada região do espaço é muito pequena. Como bastante representativo de várias investigações, podemos citar os resultados de Schouten, nos quais ele obtém uma densidade estelar média de 166.000 estrelas num cubo de 500 anos-luz de lado, sendo a distribuição em magnitude absoluta a seguinte:

| Magnitude Absoluta | Número de Estrelas | Percentual Relativo |
|--------------------|--------------------|---------------------|
| -5 a -2 | 17 | 0.01 |
| -2 a +1 | 760 | 0.5 |
| +1 a +5 | 26800 | 16 |
| +5 a +10 | 138600 | 83 |

Comparação das estrelas dos aglomerados globulares com a estrela "média". — A partir de um estudo um tanto superficial dos negativos de dez aglomerados globulares representativos, eu estimo a magnitude visual aparente média de todas as estrelas nestes aglomerados como na vizinhança do décimo oitavo. Instrumentos mais potentes podem eventualmente indicar um valor médio um pouco mais fraco, mas não parece provável que este valor tenha um erro de duas magnitudes. Temos então:

| Magnitude aparente de estrela de aglomerado média | Magnitude absoluta correspondente se a distância de, — | |
|---|--|--------------|
| | 10.000 a.l. | 100.000 a.l. |
| 18 | +5,6 | +0,6 |

Mais uma vez, vemos que a estrela F-K média de um aglomerado, se for assumida como estando

a uma distância de 10.000 anos-luz, tem uma luminosidade média aproximadamente igual à encontrada para as estrelas conhecidas mais próximas deste tipo. A distância média maior de 100.000 anos-luz exige uma proporção de estrelas gigantes enormemente maior do que a encontrada nas regiões da nossa galáxia sobre as quais temos dados de distância razoavelmente definidos.

Embora não seja impossível que os aglomerados sejam regiões excepcionais do espaço e que, com uma concentração espacial enorme de sóis, exista também uma concentração única de estrelas gigantes, a hipótese de que as estrelas dos aglomerados são, em geral, como as de distância conhecida parece inerentemente mais provável.

Parece, também, que as dimensões galácticas deduzidas de correlações entre números grandes do que podemos chamar estrelas médias devem prevalecer sobre os valores encontrados a partir de números pequenos de objetos excepcionais, e que, quando as deduções discordam, temos o direito de exigir que uma teoria das dimensões galácticas baseada no objeto ou classe excepcional não deixe de dar uma explicação adequada do objeto ou classe habitual.

A evidência para dimensões galácticas maiores. — Os argumentos a favor de um diâmetro muito maior para a nossa galáxia do que o até agora defendido e as objeções que têm sido levantadas contra a teoria do universo insular das espirais baseiam-se principalmente nas grandes distâncias que foram deduzidas para os aglomerados globulares de estrelas.

Não consigo aceitar a tese de que os aglomerados globulares encontram-se a distâncias da ordem de 100.000 anos-luz, sentindo que são necessárias muito mais provas sobre este ponto antes de ser justificável supor que as estrelas dos aglomerados são predominantemente gigantes e não estrelas médias. Sou também influenciado, talvez indevidamente, por certas incertezas fundamentais nos dados utilizados. As limitações de espaço disponíveis para a publicação desta parte da discussão impedem, infelizmente, um tratamento completo das provas. Ao chamar a atenção para algumas das incertezas nos dados basais, devo renunciar a qualquer espírito de crítica capciosa e aproveitar esta ocasião para expressar o meu respeito pelo ponto de vista do Dr. Shapley e o meu grande apreço pelo trabalho extremamente

valioso que realizou sobre os aglomerados. Estou disposto a aceitar correlações entre grandes massas de dados estelares, quer de magnitudes, velocidades radiais ou movimentos próprios, mas sinto que a dispersão nas características estelares é demasiado grande para permitir a utilização de quantidades limitadas de qualquer tipo de dados, particularmente quando esses dados são da mesma ordem que os erros prováveis dos métodos de observação.

As deduções quanto às distâncias muito grandes dos aglomerados globulares assentam, em última análise, em três linhas de evidência:

1. Determinação das distâncias relativas dos aglomerados, partindo do pressuposto que são objetos da mesma ordem de tamanho real.

2. Determinação das distâncias absolutas dos aglomerados através de correlações entre estrelas variáveis Cefeidas nos aglomerados e na nossa galáxia.

3. Determinação das distâncias absolutas dos aglomerados através de uma comparação das suas estrelas mais brilhantes com as estrelas intrinsecamente mais brilhantes da nossa galáxia.

Destes três métodos, o segundo é o mais valorizado por Shapley.

Parece razoável assumir que os aglomerados globulares são da mesma ordem de tamanho real, e que a partir dos seus diâmetros aparentes as distâncias relativas podem ser determinadas. O autor, no entanto, não colocaria uma ênfase indevida nesta relação. Não parece haver nenhuma boa razão para que não possa existir entre estes objetos uma quantidade razoável de diferença no tamanho real, digamos de três a cinco vezes, diferenças que não impediriam que fossem considerados da mesma ordem de tamanho, mas que introduziriam uma incerteza considerável nas estimativas da distância relativa.

A evidência das estrelas variáveis Cefeidas. — Esta parte da teoria de Shapley baseia-se nas três hipóteses ou linhas de evidência seguintes:

- A. Que existe uma coordenação fina entre a magnitude absoluta e a duração do período para as variáveis Cefeidas da nossa galáxia, semelhante à relação descoberta pela senhorita Leavitt entre as Cefeidas da Pequena Nuvem de Magalhães.

- B. Que, se tiverem períodos idênticos, as Cefeidas em qualquer parte do Universo têm magnitudes absolutas idênticas.

- C. Esta coordenação de magnitude absoluta e duração do período para as Cefeidas galácticas, a derivação da escala absoluta para as suas distâncias e as distâncias dos aglomerados e, combinada com A) e B), as deduções daí resultantes quanto às dimensões muito maiores para a nossa galáxia, dependem quase inteiramente dos tamanhos e das relações internas dos movimentos próprios de onze Cefeidas variáveis.

Sob o primeiro título, será visto mais tarde que a evidência real para tal coordenação entre Cefeidas galácticas é muito fraca. Desde que a Pequena Nuvem de Magalhães não seja, de alguma forma, uma região única do espaço, o comportamento das Cefeidas variáveis nesta Nuvem é, por analogia, talvez o argumento mais forte para postular um fenômeno semelhante entre as Cefeidas variáveis da nossa galáxia.

Infelizmente existe uma grande dispersão em praticamente todas as características das estrelas. O fato das Cefeidas não terem uma quantidade razoável dessa dispersão é contrário a toda a experiência com estrelas em geral. Há muitos que considerarão a suposição feita em B) acima como uma suposição bastante drástica.

Se tabularmos os movimentos próprios destas onze Cefeidas, como dados por Boss, e os seus erros prováveis também, veremos que o movimento próprio médio destas onze estrelas é da ordem de um segundo de arco por século em qualquer das coordenadas; que o erro provável médio é quase metade deste valor, e que os erros prováveis de metade destas vinte e duas coordenadas podem muito bem ser descritos como do mesmo tamanho que os movimentos próprios correspondentes.

As ilustrações relativas à incerteza dos movimentos próprios da ordem de $0''01$ por ano poderiam ser multiplicadas de forma extensa. Os erros fundamentais e inevitáveis nas nossas posições estelares, os erros prováveis das observações meridianas, a incerteza no valor adotado da constante de precessão, as incertezas introduzidas pelas correções sistemáticas aplicadas a diferentes catálogos, todos têm comparativamente pouco efeito quando se utilizam movimentos próprios tão grandes como dez segundos de arco por

século. Os movimentos próprios tão pequenos como um segundo de arco por século são, no entanto, quantidades ainda altamente incertas, independentemente da questão da possível existência de erros sistemáticos. Como ilustração das diferenças entre movimentos próprios tão diminutos como os derivados por várias autoridades, os movimentos próprios de três das mais bem determinadas desta lista de onze Cefeidas, como determinados por Auwers, estão em quadrantes diferentes dos derivados por Boss.

Não parece haver nenhuma boa razão para que as menores coordenadas desta lista de vinte e duas não venham a ser diferentes uma ou duas vezes a sua magnitude atual, com mudanças ocasionais de sinal. Uma quantidade tão pequena de dados presumivelmente incertos é insuficiente para determinar a escala da nossa galáxia, e muitos preferirão esperar por informações adicionais antes de aceitar tal evidência como conclusiva.

Em vista de:

1. As incertezas conhecidas de pequenos movimentos próprios, e,

2. A magnitude conhecida dos movimentos puramente aleatórios das estrelas, a determinação de paralaxes individuais a partir de movimentos próprios individuais nunca pode dar resultados de valor, embora as distâncias médias asseguradas por tais métodos de correlação a partir de um grande número de estrelas sejam aparentemente confiáveis. O método não pode ser considerado válido, e isto aplica-se quer os movimentos próprios sejam muito pequenos quer sejam de tamanho apreciável.

No que diz respeito às Cefeidas galácticas, a curva de Shapley de coordenação entre a magnitude absoluta e a duração do período, embora encontrada através da magnitude absoluta média do grupo de onze, assenta na realidade em paralaxes individuais determinadas a partir de movimentos próprios individuais, como pode ser verificado comparando os seus valores para a paralaxe destas onze estrelas com¹² os valores encontrados diretamente a partir da componente upsilon do movimento próprio (a saber, aquela componente

que é paralela ao movimento do Sol) e do movimento solar. As diferenças entre os dois conjuntos de valores, 0''0002 na média, resultam do sistema bastante elaborado de ponderação utilizado.

O teste final de uma relação funcional é a concordância obtida quando aplicada a dados semelhantes não utilizados originalmente na dedução da relação. Temos de estar preparados para permitir alguma medida de desvio em tal teste, mas quando uma proporção considerável de outros dados disponíveis não concordar dentro de um valor razoável, teremos justificativa para postergar a nossa decisão.

Se a curva de correlação deduzida por Shapley para as Cefeidas galácticas estiver correcta, tanto na sua escala absoluta como relativa, e se for possível determinar distâncias individuais a partir de movimentos próprios individuais, a curva de correlação, usando o mesmo método no que diz respeito aos movimentos próprios (cuja validade não admito), deve ajustar-se bastante bem a outros dados disponíveis de movimento próprio e paralaxe. As paralaxes determinadas diretamente são conhecidas para cinco deste grupo de onze, e para cinco outras Cefeidas. Há, além disso, vinte e seis outras Cefeidas para as quais foram determinados movimentos próprios. Uma delas foi omitida por Shapley devido a irregularidade do período, uma por irregularidade da curva de luz, duas porque os movimentos próprios foram considerados de precisão insuficiente, duas porque os movimentos próprios são anormalmente grandes; os movimentos próprios das outras foram recentemente investigados no Observatório de Dudley, mas têm menos peso do que os das onze Cefeidas usadas por Shapley.

Na Figura 4, as magnitudes absolutas são plotadas contra o logaritmo do período; a curva é tirada do Mt. Wilson Contr. No. 151, e é a finalmente adoptada por Shapley após a introdução de cerca de doze Cefeidas de longo período em aglomerados, vinte e cinco da Pequena Nuvem de Magalhães, e um grande número de variáveis do tipo aglomerado de curto período em aglomerados com períodos inferiores a um dia, que têm pouco efeito sobre a forma geral da curva. Os círculos barrados representam as onze Cefeidas galácticas utilizadas por Shapley, os pontos pretos as Cefeidas para as quais foram determinadas paralaxes, enquanto os círculos abertos indicam

¹²Contributions from the Mount Wilson Observatory, No. 151, Table V.

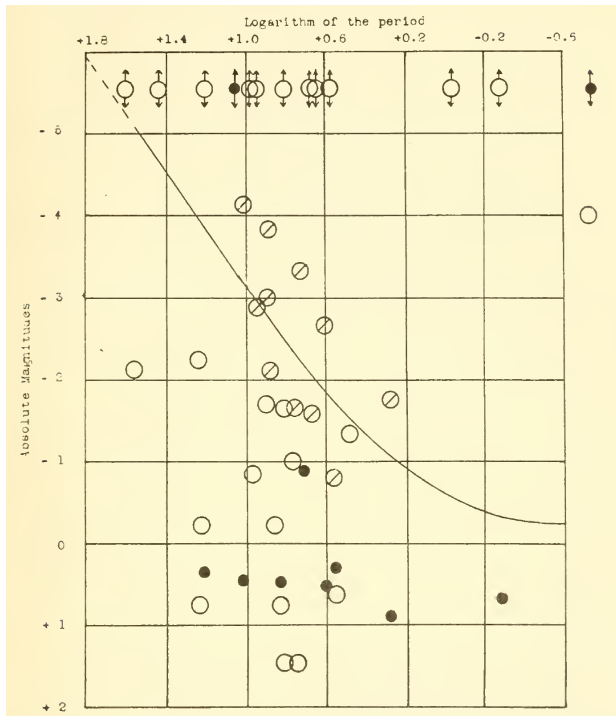


Figura 4: Concordância de outros dados com a curva de correlação luminosidade-período. As magnitudes absolutas calculadas a partir da componente upsilon do movimento próprio estão indicadas por círculos; as onze utilizadas por Shapley estão assinaladas com uma barra. Os pontos pretos representam paralaxes determinadas diretamente. As setas ligadas aos círculos na borda superior do diagrama indicam que ou a paralaxe ou a componente upsilon do movimento próprio é negativa, e a magnitude absoluta é indeterminada em consequência.

variáveis para as quais os movimentos próprios se tornaram desde então disponíveis, ou não foram utilizadas originalmente por Shapley. Para as estrelas na borda superior do diagrama, as setas anexas indicam que ou a paralaxe, ou o componente upsilon do movimento próprio é negativo, de modo que a magnitude absoluta é indeterminada, e pode ser qualquer coisa de infinito para baixo.

Pelo exposto, parece que os dados observacionais disponíveis dão pouco apoio ao fato de haver uma relação período-luminosidade entre as Cefeidas galácticas. Em vista das grandes discrepâncias mostradas por outros membros do grupo quando plotados nesta curva, parece mais sensato esperar por evidências adicionais quanto ao movimento próprio, velocidade radial e, se possível, paralaxe, antes que se possa colocar toda a confiança na hipótese de que as Cefeidas e as variáveis do tipo aglomerado são invariavelmente supergi-

gantes em luminosidade absoluta.

Argumento das estrelas intrinsecamente mais brilhantes. — Se a lei de luminosidade-frequência é a mesma para as estrelas dos aglomerados globulares e para a nossa galáxia, deveria ser possível correlacionar as estrelas intrinsecamente mais brilhantes de ambas as regiões e assim determinar as distâncias dos aglomerados. Parece, a priori, que as estrelas mais brilhantes dos aglomerados devem ser gigantes, ou pelo menos aproximar-se desse tipo, se as estrelas dos aglomerados forem como a generalidade das estrelas. Através da aplicação de um método espectroscópico, Shapley descobriu que os espectros das estrelas mais brilhantes em aglomerados se assemelham aos espectros das estrelas gigantes galácticas, um método que deverá ser extremamente útil depois de terem sido feitos testes suficientes para garantir que neste fenômeno, como é infelizmente o caso em praticamente todas as características estelares, não há uma grande dispersão, e também se pequenas diferenças no tipo espectral podem afetar materialmente as deduções.

A estrela "gigante" média. — Determinando a distância do Messier 3 a partir das estrelas variáveis que contém, Shapley deriva então a magnitude absoluta $-1,5$ como a luminosidade média das vinte e cinco estrelas mais brilhantes deste aglomerado. A partir deste valor médio, $-1,5$, ele determina então as distâncias de outros aglomerados. No entanto, em vez de determinar distâncias de aglomerados da ordem dos 100.000 anos-luz por meio de correlações num número limitado de variáveis Cefeidas, uma classe pequena e possivelmente excepcional, e a partir das distâncias assim obtidas deduzir que as magnitudes absolutas de muitas das estrelas mais brilhantes dos aglomerados são tão grandes como -3 , enquanto uma grande proporção é maior do que -1 , parece preferível começar a linha de raciocínio com os atributos de estrelas conhecidas na nossa vizinhança, e proceder a partir delas para os aglomerados.

Qual é a magnitude absoluta média de uma estrela gigante galáctica? Neste ponto há espaço para uma honesta diferença de opinião, e haverá sem dúvida muitos que considerarão as conclusões deste artigo como ultra conservadoras. Limitando-nos aos dados observacionais existentes, não há provas de que um grupo de gigantes galácticas, de tipo espectral médio cerca de G5,

tenha uma magnitude absoluta média tão grande como $-1,5$; é mais provável que esteja na vizinhança de $+1,5$, ou três magnitudes absolutas mais fracas, tornando as distâncias de Shapley quatro vezes maiores.

Neste contexto, vale a pena citar a sugestão de Russell, escrita em 1913, quando os dados de paralaxe eram muito mais limitados e menos confiáveis do que atualmente:

As estrelas gigantes de todas as classes espectrais parecem ter aproximadamente o mesmo brilho médio, — com uma média um pouco acima da magnitude absoluta zero, ou seja, cerca de cem vezes mais brilhante que o Sol. Uma vez que as estrelas desta série... foram selecionadas pelo brilho aparente, que dá uma forte preferência às de maior luminosidade, o brilho médio de todas as estrelas gigantes numa dada região do espaço deve ser inferior a isto, talvez consideravelmente.

Já foi feita alguma referência ao valor duvidoso das paralaxes da ordem de $0''010$, e é dessas paralaxes pequenas ou negativas que depende a maior parte das grandes luminosidades absolutas nas listas atuais. Parece claro que o trabalho de paralaxe deve ter como objetivo a utilização de estrelas de comparação tão fracas quanto possível, e que as correções aplicadas para reduzir as paralaxes relativas a paralaxes absolutas devem ser aumentadas consideravelmente em relação ao que era considerado aceitável há dez anos atrás.

A partir de um estudo das magnitudes absolutas plotadas por tipo espectral de cerca de quinhentas paralaxes diretas modernas, com a devida consideração pelas incertezas das paralaxes diminutas, e tendo em mente que a maioria das gigantes serão dos tipos F a M, parece haver pouca razão para colocar a magnitude absoluta média de tais estrelas gigantes como mais brilhante do que $+2$.

A magnitude absoluta média para as gigantes na lista de Adams de quinhentas paralaxes espectroscópicas é $+1,1$. Os dois métodos diferem mais nas estrelas do tipo G, onde o método espectroscópico mostra um máximo em $+0,6$, que não é muito evidente nas paralaxes trigonométricas.

Em aglomerados de estrelas em movimento como o grupo das Híades, observamos até agora, evidentemente, apenas as estrelas gigantes de tais grupos.

A magnitude absoluta média de quarenta e

quatro estrelas que se acredita pertencerem ao aglomerado móvel das Híades é $+2,3$. A magnitude absoluta média das treze estrelas dos tipos F, G e K é de $+2,4$. A magnitude absoluta média das seis estrelas mais brilhantes é de $+0,8$ (duas A5, uma G e três do tipo K).

As Plêiades não podem ser adequadamente comparadas com estes aglomerados ou com os aglomerados globulares; a sua composição parece ser completamente diferente, uma vez que as estrelas mais brilhantes são em média de tipo B5, e apenas entre as estrelas mais fracas do aglomerado existem algumas tão altas quanto F em tipo. A paralaxe deste grupo é ainda muito incerta. Com o valor de Schouten de $0''037$ a magnitude absoluta média das seis estrelas mais brilhantes é $+1,6$.

Com a devida permissão para a vermelhidão das gigantes nos aglomerados, a magnitude visual média de Shapley das vinte e cinco estrelas mais brilhantes em vinte e oito aglomerados globulares é de cerca de $14,5$. Então, a partir da equação dada na primeira seção deste artigo, temos, -

$$+2 = 14,5 + 7,6 - 5 \times \log(\text{distância}),$$

ou, $\log(\text{distância}) = 4,02 = 10.500$ anos-luz como distância média.

Se, em vez disso, adotarmos o valor médio de Adams $+1,1$, a distância passa a ser de 17.800 anos-luz.

Qualquer um dos valores para a distância média dos aglomerados pode ser considerado satisfatoriamente próximo dos postulados para uma galáxia das dimensões menores consideradas neste trabalho, tendo em conta as muitas incertezas nos dados. Qualquer um destes valores, também, dará, com base nos mesmos pressupostos, uma distância da ordem dos 30.000 anos-luz para alguns dos aglomerados mais tênues e aparentemente mais distantes. Considero muito duvidoso que qualquer aglomerado esteja realmente tão distante como este, mas não encontro qualquer dificuldade em aceitá-lo provisoriamente como uma possibilidade, sem que isso implique necessariamente alargar a estrutura principal da galáxia a tais dimensões. Embora os aglomerados pareçam concentrados em direção ao nosso plano galáctico, a sua distribuição em longitude é muito irregular, estando quase todos situados no quadrante entre

270° e 0°. Se as espirais são galáxias de estrelas, a sua analogia explicaria a existência de nódulos de condensação frequentes (aglomerados globulares?) situados bem fora e distintos da estrutura principal de uma galáxia.

Deve admitir-se que as estrelas do tipo B constituem uma espécie de dilema em qualquer tentativa de as utilizar para determinar as distâncias dos aglomerados.

A partir da pequenez dos seus movimentos próprios, a maioria dos investigadores deduziu luminosidades muito grandes para essas estrelas na nossa galáxia. Examinando os valores de Kapteyn para estrelas deste tipo, ver-se-á que ele encontra um intervalo em magnitude absoluta de +3,25 a -5,47. Dividindo as 433 estrelas da sua lista em dois grupos de magnitude, temos:

| | |
|--|---------|
| Mag. absoluta média 249 estrelas B, mais brilhante que mag. absoluta | = -1,32 |
| Mag. absoluta média 184 estrelas B, menos brilhante que mag. absoluta | = +0,99 |
| Mag. absoluta média todas | = -0,36 |

Ou o valor para as estrelas mais brilhantes, -1,32, ou a média de todas, -0,36, é mais de uma magnitude mais brilhante do que a magnitude absoluta média das gigantes dos outros tipos espectrais entre as estrelas galácticas mais próximas.

Agora, esta relação galáctica é aparentemente invertida em aglomerados como M.3 ou M.13, onde as estrelas do tipo B são cerca de três magnitudes mais fracas do que as estrelas K e M mais brilhantes e cerca de uma magnitude mais fracas do que as do tipo G. Supondo que os valores muito elevados atuais para as estrelas galácticas do tipo B estão corretos, se assumirmos uma luminosidade semelhante para as dos aglomerados, devemos atribuir magnitudes absolutas de -3 a -6 às estrelas F a M dos aglomerados, para as quais não temos um paralelo galáctico certo, com uma distância de talvez 100.000 anos-luz. Por outro lado, se as estrelas F a M do aglomerado forem como as estrelas mais brilhantes destes tipos na galáxia, a magnitude absoluta média das estrelas do tipo B será apenas cerca de +3, e demasiado baixa para concordar com os valores atuais das estrelas B galácticas. Eu prefiro aceitar a última alternativa neste dilema, e acreditar que podem

existir estrelas do tipo B com apenas duas a cinco vezes o brilho do Sol.

Embora eu defenda uma teoria das dimensões galácticas aproximadamente um décimo da defendida por Shapley, não significa que mantenha esta razão para qualquer distância específica do aglomerado. Tudo o que tentei fazer foi mostrar que 10.000 anos-luz é uma distância média razoável para os aglomerados.

Há tantas suposições e incertezas envolvidas que estou muito hesitante em tentar atribuir uma determinada distância a um determinado aglomerado, uma hesitação que não é diminuída por uma consideração das seguintes estimativas da distância de M.13 (O Grande Aglomerado em Hércules).

| | |
|---------------------------|------------------|
| Shapley, 1915, provisório | 100.000 anos-luz |
| Charlier, 1916 | 170 anos-luz |
| Shapley, 1917 | 36.000 anos-luz |
| Schouten, 1918 | 4.300 anos-luz |
| Lundmark, 1920 | 21.700 anos-luz |

Deve ser dito aqui que a estimativa anterior de Shapley era meramente uma suposição provisória para ilustração computacional, mas todas são baseadas em material moderno e ilustram o fato de que boas evidências podem frequentemente ser interpretadas de maneiras diferentes.

A minha própria estimativa, baseada nas considerações gerais delineadas anteriormente neste artigo, seria de cerca de 8.000 anos-luz, e parece, atualmente, que esta estimativa está talvez a cinquenta por cento da verdade.

As espirais como galáxias externas

As espirais. — Se as espirais são universos-ilhas, parece razoável e mais provável atribuir-lhes dimensões da mesma ordem que a nossa galáxia. Se, no entanto, as suas dimensões são tão grandes como 300.000 anos-luz, os universos-ilha devem estar situados a distâncias tão enormes que seria necessário atribuir magnitudes absolutas que parecem impossivelmente grandes às novas que apareceram nestes objetos. Por esta razão, a teoria do universo insular tem uma relação indireta com o assunto geral das dimensões galácticas, embora seja, naturalmente, inteiramente possível manter tanto a teoria do universo insular como a crença

nas dimensões maiores da nossa galáxia, fazendo a suposição não improvável de que o nosso próprio universo insular, por acaso, é várias vezes maior do que a média.

Alguns dos argumentos contra a teoria do universo-ilha das espirais foram apresentados de forma convincente por Shapley e serão citados aqui como referência. É justo afirmar que estas declarações anteriores não representam adequadamente o ponto de vista atual de Shapley, que coincide um pouco mais com o defendido pelo autor.

Com o plano do sistema sidereal aqui delineado, parece improvável que as nebulosas espirais possam ser consideradas galáxias de estrelas separadas. Para além da evidência até agora existente, os seguintes pontos parecem opostos à teoria do "universo insular": (a) o carácter dinâmico da região de evasão; (b) o tamanho da galáxia; (c) a luminosidade máxima atingível por uma estrela; (d) a crescente frequência de altas velocidades entre outros objetos siderais, particularmente aqueles fora da região de evasão... os trabalhos de aglomerados sugerem fortemente a hipótese que as nebulosas espirais... são, no entanto, membros da organização galáctica... as novas em espirais podem ser consideradas como uma estrela que foi engolida pela nebulosidade em movimento rápido. (Publ. Astron. Soc. of the Pacific, Fev. 1918, p. 53.)

O recente trabalho sobre aglomerados estelares, na medida em que lança alguma luz sobre a provável extensão e estrutura do sistema galáctico, justifica uma breve reconsideração da questão das galáxias externas, e aparentemente leva à rejeição da hipótese de que as nebulosas espirais devem ser interpretadas como sistemas estelares separados.

Abandonemos a comparação com a galáxia e assumamos uma distância média para as espirais mais brilhantes que dará uma magnitude absoluta máxima razoável para as novas (e em nota de rodapé; — provisoriamente, digamos, da ordem de 20.000 anos-luz). Além disso, é possível explicar a distribuição peculiar das espirais e a

sua recessão sistemática, supondo-as repelidas de alguma forma do sistema galáctico, que parece mover-se como um todo através de um campo nebuloso de extensão indefinida. Mas a possibilidade destas hipóteses não é, evidentemente, proposta como prova competente contra a teoria do "universo insular". . . . A observação e discussão das velocidades radiais, movimentos internos e distribuição das nebulosas espirais, do brilho real e aparente das novas, da luminosidade máxima das estrelas galácticas e dos aglomerados e, finalmente, das dimensões do nosso próprio sistema galáctico, parecem opor-se definitivamente à hipótese do "universo insular" das nebulosas espirais. . . . [Publ. Astron. Soc. of the Pacific, Out. 1919, pp. 261 ff.)

O dilema das dimensões aparentes das espirais.— Em termos de tamanho aparente, as espirais variam desde um diâmetro de 2° (Andrômeda), até manchas minúsculas de 5", ou menos, de diâmetro.

Podem possivelmente variar em tamanho real, aproximadamente na progressão exibida pelas suas dimensões aparentes.

O princípio geral da igualdade aproximada de tamanho para objetos celestes da mesma classe parece, no entanto, inerentemente o mais provável, e tem sido usado em numerosas investigações modernas, por exemplo, por Shapley na determinação das distâncias relativas dos aglomerados.

Com base neste princípio de igualdade aproximada do tamanho real:

Como Universos Insulares

As suas distâncias prováveis vão desde cerca de 500.000 anos-luz (Andrômeda), até distâncias da ordem dos 100.000.000 anos-luz. A 500.000 anos-luz a Nebulosa de Andrômeda teria 17.000 anos-luz de diâmetro, ou seja, da mesma ordem de grandeza da nossa galáxia.

Como fenômenos galácticos

Se a Nebulosa de Andrômeda está apenas a 20.000 anos-luz de distância, as espirais diminutas teriam de estar a distâncias da ordem dos 10.000.000 anos-luz, ou seja, muito fora das dimensões maiores postuladas para a galáxia. Se todos são objetos galácticos, a igualdade de tamanho deve ser abandonada e as espirais diminutas devem ser cerca de mil vezes menor do que as maiores.

O espectro das Espirais.—*Como Universos Insulares*

O espectro de uma espiral média é indistinguível daquele dado por um aglomerado de estrelas. É aproximadamente do tipo F-G e, em termos gerais, assemelha-se muito ao espectro integrado da nossa Via Láctea. É exatamente o espectro que seria de esperar de uma vasta coleção de estrelas. O espectro das espirais não oferece dificuldades à teoria do universo insular.

Como fenômenos galácticos

Se as espirais são intragalácticas, temos de assumir que são algum tipo de matéria finamente dividida, ou de constituição gasosa. Em ambos os casos, não temos nenhuma evidência adequada e realmente existente pela qual possamos explicar o seu espectro. Muitas nebulosidades difusas da nossa galáxia mostram um espectro gasoso de linhas brilhantes. Outras, associadas a estrelas brilhantes, concordam com as estrelas envolvidas no espectro, e são bem explicadas como um efeito de reflexão ou ressonância. Tal explicação parece insustentável para a maioria das espirais.

A distribuição das espirais.— As espirais são encontradas em maior número precisamente onde as estrelas são menos numerosas (nos pólos galácticos), e não onde as estrelas são mais numerosas (no plano galáctico). Este fato torna difícil, senão impossível, encaixar as espirais em qualquer esquema coerente de evolução estelar, quer como ponto de origem, quer como produto evolutivo final. Até à data, ainda não foi encontrada nenhuma espiral efetivamente dentro da estrutura da Via Láctea.

Esta distribuição peculiar é reconhecidamente difícil de explicar em qualquer teoria. Este fator de distribuição nas duas teorias pode ser contrastado como se segue:

Como Universos Insulares

É muito improvável que a nossa galáxia esteja, por mero acaso, situada a meio caminho entre dois grandes grupos de universos-ilhas. Várias espirais de perfil mostram anéis periféricos de matéria oculta de forma que este anel escuro pode muito bem ser a regra e não a exceção. Se a nossa galáxia, ela própria uma espiral na teoria

do universo-ilha, possuir um tal anel periférico de matéria oculta, isso obliteraria as espirais distantes no nosso plano galáctico e explicaria a peculiar distribuição aparente das espirais. Há alguma evidência de tal matéria oculta na nossa galáxia. No que diz respeito ao excesso de velocidades de recessão observado, observações adicionais podem eliminar este fato. Parte do excesso pode muito bem ser devido ao movimento da nossa própria galáxia no espaço. A Nebulosa de Andrômeda está se aproximando de nós.

Como fenômenos galácticos

Se as espirais são objetos galácticos, devem ser uma classe à parte de todos os outros tipos conhecidos: porque nenhuma na nossa vizinhança? A sua aversão às regiões de maior densidade estelar só pode ser explicada na hipótese de que elas são, de alguma forma desconhecida, repelidas pelas estrelas. Não conhecemos nenhuma força adequada para produzir tal repulsão, exceto talvez a pressão da luz. Porque é que esta repulsão tem invariavelmente atuado essencialmente em ângulos retos em relação ao nosso plano galáctico? Porque é que alguns não foram repelidos na direção do nosso plano galáctico? A teoria da repulsão, é verdade, é apoiada pelo fato de que a maioria das espirais observadas até o momento estão se afastando de nós.

As velocidades espaciais das espirais.—

Como Universos Insulares

As espirais observadas até à data têm a enorme velocidade espacial média de 1200 km/s. Neste fator de velocidade, elas distinguem-se de todos os objetos galácticos. A sua velocidade espacial é cem vezes superior à das nebulosidades difusas galácticas, cerca de trinta vezes superior à velocidade média das estrelas, dez vezes superior à das nebulosas planetárias e cinco vezes superior à dos aglomerados. Velocidades tão elevadas parecem possíveis para galáxias individuais. A nossa própria galáxia tem provavelmente uma velocidade espacial, relativamente ao sistema das espirais, de várias centenas de km/seg. Foram feitas tentativas para derivar esta velocidade a partir das velocidades das espirais, mas ainda são incertas, pois só temos as velocidades radiais de trinta espirais.

Como fenômenos galácticos

Foram encontradas velocidades espaciais de várias centenas de km/seg. para algumas das estrelas mais fracas. Tem sido argumentado que uma extensão dos levantamentos de velocidade radial para as estrelas mais fracas possivelmente removeria a discrepância entre as velocidades das estrelas e as das espirais. Isto é possível, mas não parece provável. As estrelas fracas até agora selecionadas para investigação foram estrelas com movimentos próprios grandes conhecidos. São objetos excepcionais através deste método de seleção, não são objetos representativos. Velocidades espaciais elevadas são a regra, não a exceção, para as espirais. Velocidades espaciais elevadas continuam a ser a exceção, e não a regra, para as estrelas da nossa galáxia.

Movimentos próprios das espirais.— Se os resultados do próximo quarto de século mostrarem um acordo estreito entre diferentes observadores no sentido de que os movimentos anuais de translação ou rotação das espirais são iguais ou excedem $0",01$ em valor médio, parece que a teoria do universo insular deve ser definitivamente abandonada.

Um movimento de 700 km/seg. através da nossa linha de visada produzirá os seguintes movimentos próprios anuais :

| | | | | |
|--------------------|---------|----------|----------|-----------|
| Distância anos-luz | 10^3 | 10^4 | 10^5 | 10^6 |
| Mov. prop. anual | " $,48$ | " $,048$ | " $,005$ | " $,0005$ |

As observações visuais mais antigas das espirais têm um erro provável tão grande que são inúteis para a determinação de movimentos próprios, se forem pequenos; o intervalo de tempo disponível para determinações fotográficas é inferior a vinte e cinco anos.

O primeiro movimento próprio dado acima deveria inevitavelmente ter sido detectado por métodos visuais ou fotográficos, pelo que parece claro que as espirais não podem estar relativamente perto de nós nos pólos do nosso disco galáctico achatado. Tendo em conta o caráter nebuloso das condensações medidas, considero que a determinação fidedigna do segundo movimento próprio acima referido é impossível pelos métodos atuais sem um intervalo de tempo muito maior do que o atualmente disponível; para o terceiro e o quarto, precisaríamos de séculos.

Novas estrelas nas espirais.— Nos últimos anos, cerca de vinte e sete novas estrelas apareceram em espirais, dezesseis das quais na Nebulosa de Andrômeda, contra cerca de trinta e cinco que apareceram na nossa galáxia nos últimos três séculos. Tanto quanto se pode julgar a partir de objetos tão tênues, as novas em espirais têm uma história de vida semelhante à das novas galácticas, subitamente brilhando, e mais lentamente, mas ainda relativamente rápido, afundando-se novamente para uma luminosidade dez mil vezes menos intensa. Essas novas formam um forte argumento para a teoria do universo insular e fornecem, além disso, um método para determinar as distâncias aproximadas das espirais.

Com todos os seus elementos de simplicidade e continuidade, o nosso universo é demasiado aleatório nos seus detalhes para justificar deduções a partir de um número pequeno de objetos excepcionais. Quando não existe outra correlação disponível, tais deduções devem ser feitas com cautela e com uma apreciação completa das incertezas envolvidas.

Parece certo, por exemplo, que a dispersão das novas nas espirais, e provavelmente também na nossa galáxia, pode atingir pelo menos dez magnitudes absolutas, como é evidenciado por uma comparação de S Andromedae com as novas tênues encontradas recentemente nesta espiral. Uma divisão em duas classes de magnitude não é impossível.

A Nova de Tycho, para ser comparável em magnitude absoluta com algumas novas galácticas recentes, não podia estar a mais de dez anos-luz de distância. Se estivesse tão perto de nós quanto cem anos-luz, deveria ter tido uma magnitude absoluta de -8 no máximo; se estivesse apenas a mil anos-luz de distância, teria tido uma magnitude absoluta de -13 no máximo.

As distâncias e magnitudes absolutas de apenas quatro novas galácticas foram até agora determinadas; a magnitude absoluta média é -3 no máximo e $+7$ no mínimo.

Estes valores médios, embora se baseiem reconhecidamente numa quantidade muito limitada de dados, podem ser comparados com as novas mais fracas que apareceram na Nebulosa de Andrômeda, mais ou menos da seguinte forma: onde se assume 500.000 anos-luz para esta espiral na hipótese do universo insular e, para comparação,

a distância menor de 20.000 anos-luz.

| | Magnitude aparente | |
|-----------|-------------------------|---|
| | trinta novas galácticas | Dezesseis novas na Nebulosa Andromedae |
| no máximo | +5 | +17 |
| no mínimo | +15 ± | +27 (?; conjecturado pela analogia das novas galáctica) |

| | Magnitude Absoluta | | |
|-----------|--|---|--------|
| | 4 novas galácticas com dist. conhecida | Dezesseis novas em Andromeda, se (anos-luz) – | |
| | | 500.000 | 20.000 |
| no máximo | -3 | -4 | +3 |
| no mínimo | +7 | +6? | +13? |

Verificar-se-á do que precede que, à distância maior da teoria do universo insular, a concordância em magnitude absoluta é bastante boa para as novas galácticas e espirais. No entanto, se estiverem tão perto quanto 20.000 anos-luz, estas novas devem ser diferentes de objetos galácticos semelhantes, e de magnitude absoluta incomumente baixa no mínimo. Muito poucas estrelas foram até agora encontradas com uma luminosidade tão baixa como a magnitude absoluta +13, correspondendo, a esta distância, à magnitude aparente 27.

A hipótese simples de que as novas em espirais representam o deterioração de estrelas galácticas comuns pela nebulosidade em movimento rápido torna-se uma possibilidade nesta base de distância (i.e., 20.000 anos-luz), pois as espirais mais brilhantes estão dentro dos limites do sistema galáctico (Shapley).

Esta hipótese da origem das novas em espirais está sujeita a graves objeções. Ela envolve:

1. Que as estrelas assim consideradas (thus overtaken) são de menor luminosidade absoluta do que as mais fracas até agora observadas, com muito poucas exceções.
2. Que essas estrelas fracas são extraordinariamente numerosas, uma conclusão que está

em desacordo com os resultados das contagens de estrelas, que parecem indicar que há uma queda acentuada no número de estrelas abaixo da magnitude aparente 19 ou 20.

Como ilustração das dificuldades que acompanham uma tal hipótese, fiz uma contagem das estrelas em várias áreas em torno da Nebulosa de Andrômeda, incluindo, acredita-se, estrelas pelo menos tão fracas como a magnitude 19.5, e encontrei uma densidade de estrelas, incluindo todas as magnitudes, de cerca de 6.000 estrelas por grau quadrado.

Se não estiver a mais de 20.000 anos-luz de distância, esta espiral situar-se-á a 7.000 anos-luz do plano da Via Láctea e, se se mover a uma velocidade de 300 km/s, percorrerá 385 anos-luz cúbicos por ano.

Para tornar o caso tão favorável quanto possível para a hipótese sugerida, suponhamos que nenhuma das 6.000 estrelas por grau quadrado está tão perto quanto 15.000 anos-luz, mas que todas estão dispostas num estrato que se estende 5.000 anos-luz para cada lado da espiral.

Então a Nebulosa de Andrômeda deveria encontrar uma destas estrelas a cada 520 anos. Assim, a taxa real a que as novas foram encontradas nesta espiral indicaria uma densidade estelar cerca de duas mil vezes maior do que a indicada pela contagem; cada estrela ocuparia cerca de um segundo de arco quadrado na chapa fotográfica.

As espirais como universos insulares: resumo.—

1. Nesta teoria evitamos as dificuldades quase insuperáveis envolvidas numa tentativa de encaixar as espirais em qualquer esquema coerente de evolução estelar, quer como um ponto de origem, quer como um produto evolutivo.

2. Nesta teoria é desnecessário tentar coordenar as enormes velocidades espaciais das espirais com as da estrela média.

3. O espectro das espirais é tal como seria de esperar de uma galáxia de estrelas.

4. Uma estrutura espiral foi sugerida para a nossa própria galáxia, e não é improvável.

5. Se forem universos insulares, as novas estrelas observadas nas espirais parecem ser uma consequência natural da sua natureza como galáxias. As correlações entre as novas nas espirais e aquelas da nossa galáxia indicam distâncias que vão desde talvez 500.000 anos-luz, no caso da Nebulosa de Andrômeda, até 10.000.000 ou mais anos-luz, no caso das espirais mais remotas.

6. A tais distâncias, estes universos-ilha seriam da mesma ordem de grandeza da nossa própria galáxia.

7. Muitas espirais mostram evidências de anéis periféricos de matéria oculta nos seus planos equatoriais. Um tal fenômeno na nossa galáxia, considerada como uma espiral, serviria para obliterar as espirais distantes no nosso plano galáctico e forneceria uma explicação adequada para a distribuição inexplicável das espirais.

Há uma unidade e um acordo interno nas características da teoria do universo insular que me

atrai fortemente. A prova relativa às dimensões da galáxia, de ambos os lados, é demasiada incerta como está para permitir qualquer pronunciamento dogmático. Há muitos pontos de dificuldade em ambas teorias das dimensões galácticas, e é sem dúvida verdade que muitos preferirão não julgar até que surjam muitas provas adicionais. No entanto, até que estejam disponíveis provas mais definitivas em contrário, sinto que a evidência para as dimensões galácticas menores e comumente aceitas é ainda a mais forte; e que o diâmetro postulado de 300.000 anos-luz deve certamente ser dividido por cinco, e talvez por dez.

Mantenho, portanto, a convicção de que a galáxia não tem provavelmente mais de 30.000 anos-luz de diâmetro; que as espirais não são objetos intragalácticos mas universos insulares, como a nossa própria galáxia, e que as espirais, como galáxias exteriores, nos indicam um universo maior no qual podemos penetrar a distâncias de dez milhões a cem milhões de anos-luz.