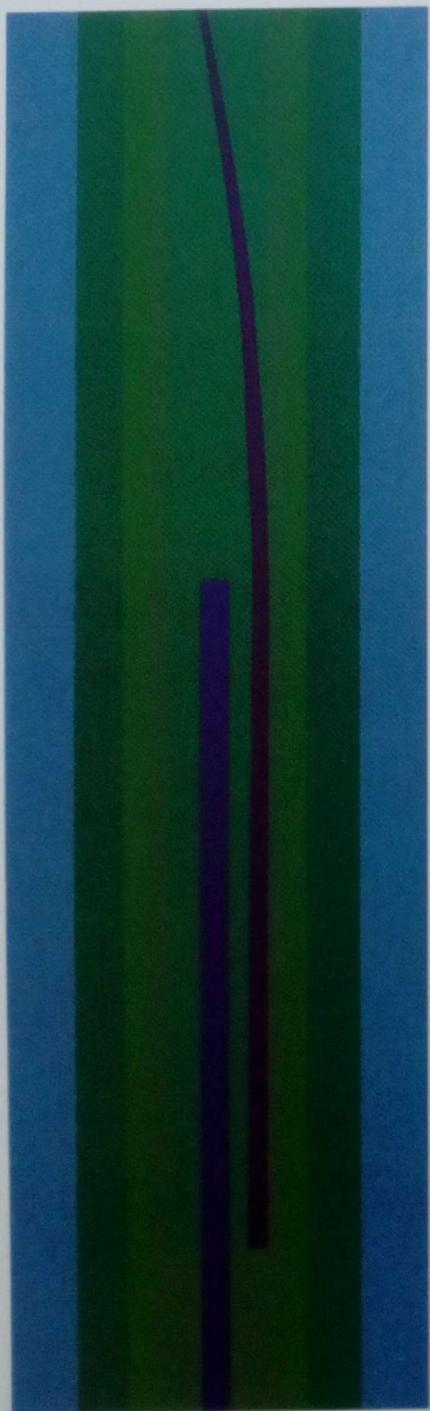


ASTRONOMIA

UMA VISÃO GERAL DO UNIVERSO

Amâncio C. S. Friaça
Elisabete Dal Pino
Laerte Sodré Jr.
Vera Jatenco-Pereira
(organizadores)

edusp



Copyright © 2000 by Vera Jatenco-Pereira e outros

1ª edição 2000

2ª edição 2003

Vencedor do Prêmio Jabuti 2001

Melhor Livro de Ciências Exatas

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Astronomia: Uma Visão Geral do Universo. – 2.ed. – São Paulo:
Editora da Universidade de São Paulo, 2003. (Acadêmica; 28).

Vários autores.

Vários organizadores.

Bibliografia.

ISBN 85-314-0462-2

1. Astronomia.

98-3329

CDD-520

Índices para catálogo sistemático:

1. Astronomia 520

Direitos reservados à

Edusp – Editora da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Luciano Gualberto, Travessa J, 374
6º andar – Ed. da Antiga Reitoria – Cidade Universitária
05508-900 – São Paulo – SP – Brasil Fax (0xx11) 3091-4151
Tel. (0xx11) 3091-4008 / 3091-4150
www.usp.br/edusp – e-mail: edusp@edu.usp.br

IAG – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências
Atmosféricas da Universidade de São Paulo
Rua do Matão, 1226 – Cidade Universitária
05508-900 – São Paulo – SP – Brasil Fax (0xx11) 3091-2860
Tel. (0xx11) 3091-2710 / 3091-2814 / 3091-2800
www.iag.usp.br
www.astro.iag.usp.br (Dep. de Astronomia)

Printed in Brazil 2003

Foi feito o depósito legal

SUMÁRIO

Prefácio	11
1. O Nosso Universo – <i>ANTONIO MÁRIO MAGALHÃES</i>	13
O Sistema Solar	13
As Estrelas Mais Próximas	14
A Nossa Galáxia	15
A Galáxia e suas Vizinhas: o Grupo Local	18
Os Aglomerados de Galáxias e o Universo	19
Retrospectiva	21
2. As Ferramentas do Astrônomo – <i>ANTONIO MÁRIO MAGALHÃES</i>	23
A Natureza da Luz	23
Telescópios	27
Imagens e Fotometria	29
Espectroscopia	32
3. Astronomia Clássica – <i>ROBERTO BOCZKO E NELSON VANI LEISTER</i>	35
As Primeiras Medidas do Céu	35
O Movimento Aparente dos Corpos Celestes	38
Coordenadas na Esfera Celeste	40
As Fases da Lua e o Mês	42
As Estações e o Ano	44
Medidas de Tempo	45
Calendários	46
Os Eclipses	48

4. A Mecânica Celeste – <i>SYLVIO FERRAZ-MELLO E JÚLIO CÉSAR KLAFKE</i>	51
Introdução	51
A Cinemática Celeste Pré-Newtoniana	51
A Mecânica Celeste Newtoniana	54
A Mecânica Celeste depois de Einstein	58
A Mecânica do Sistema Solar	60
Outros Mundos	70
Caos	76
5. O Sol – <i>OSCAR T. MATSUURA E ENOS PICAZZIO</i>	81
Introdução	81
Dados Básicos	81
Estrutura Interna do Sol	84
Atmosfera do Sol	87
Atividade Solar	95
6. O Sistema Solar – <i>OSCAR T. MATSUURA E ENOS PICAZZIO</i>	103
Introdução	103
Os Planetas	104
Corpos Menores	124
Formação do Sistema Solar	134
7. Estrelas – <i>AUGUSTO DAMINELLI NETO</i>	139
Introdução	139
O Sol: uma Estrela Modelo	140
As Estrelas: outros Sóis	144
O Diagrama H-R: um Retrato de Família	151
A Vida na Seqüência Principal	154
O Nascimento de uma Estrela	157
Evolução Pós-Sqüência Principal	158
Os Dois Tipos de Morte das Estrelas	161
8. Objetos Estelares Compactos – <i>JORGE ERNESTO HORVATH</i>	165
A Morte das Estrelas	165
Anãs Brancas	168
O Final das Estrelas Massivas: Colapso Gravitacional e Supernovas	169
Pulsares, Estrelas de Nêutrons e Remanescentes de Supernova	172
Buracos Negros	176
9. A Galáxia – <i>WALTER JUNQUEIRA MACIEL</i>	179
Introdução	179
Breve Histórico	180

Estrutura e Constituintes da Galáxia	183
Populações Estelares	188
A Rotação da Galáxia	189
A Natureza Espiral da Via-Láctea	193
10. Galáxias – SANDRA DOS ANJOS E RONALDO E. DE SOUZA	195
Introdução	195
Morfologia das Galáxias	197
Populações Estelares	199
11. Galáxias Ativas e Quasares – ELISABETE M. DE GOUVEIA DAL PINO E VERA JATENCO-PEREIRA	201
Introdução	201
Os NAGs	202
Quasares	210
Fontes de Energia dos NAGs e Quasares: Buracos Negros?	214
12. A Distribuição das Galáxias no Universo – AMÂNCIO C. S. FRIÇA E LAERTE SODRÉ JR.	219
O Grupo Local	219
Grupos e Aglomerados de Galáxias	221
Superaglomerados de Galáxias	222
Gás Intra-Aglomerado	223
As Radiações de Fundo	225
13. Cosmologia – ROBERTO D. DIAS DA COSTA	227
A Evolução do Conceito de Universo	227
A Expansão do Universo	230
Modelos de Universo	232
A Origem do Universo: o Big-Bang	237
Constantes e Unidades	243
Atlas	245
Referências Bibliográficas	273

PREFÁCIO

Desde fins da década de 80, o Departamento de Astronomia do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo vem oferecendo anualmente cursos de extensão universitária de Astronomia e Astrofísica direcionados a professores do ensino secundário, objetivando oferecer-lhes uma visão geral e correta dos conceitos fundamentais dessas áreas da ciência. A ausência de textos em língua portuguesa dessa abrangência e com linguagem e nível adequados, não apenas para professores e estudantes do secundário, como também para um público leigo interessado, levou-nos à elaboração do texto presente neste volume.

Através de ilustrações e imagens colhidas com telescópios e de uma linguagem simples e direta, evitando tanto quanto possível uma abordagem matemática, este livro pretende levar o leitor através de uma viagem pelo Cosmos e apresentar-lhe as noções fundamentais da Astronomia e da Astrofísica.

O livro é composto de treze capítulos escritos por professores do Departamento de Astronomia, diretamente envolvidos em pesquisas nos temas abordados. O capítulo 1 leva o leitor a um rápido passeio pelo Universo, começando pelo nosso planeta, saindo, em seguida, para o Sistema Solar e deste através da Galáxia, penetrando depois em outras galáxias e aglomerados de galáxias, até as fronteiras do Universo. Nos capítulos seguintes, cada um desses componentes do Universo são estudados de maneira mais profunda, varrendo as grandes áreas do conhecimento em Astronomia e Astrofísica. No final do volume encontra-se um atlas ilustrativo com imagens que são indicadas em todos os capítulos.

os organizadores

O NOSSO UNIVERSO

Antonio Mário Magalhães

O SISTEMA SOLAR

Nossa viagem pelo Universo começa pelo nosso quintal, o Sistema Solar. Depois da Terra (Atlas, imagem 1), provavelmente os constituintes mais conhecidos de nós no céu são a Lua (Atlas, imagem 2) e o Sol (Atlas, imagens 3 e 4), a estrela do nosso sistema planetário.

A distância média entre nosso satélite natural, a Lua, e a Terra é de aproximadamente 384 000 km. Como a velocidade da luz é de 300 000 km por segundo, podemos dizer que a distância entre a Terra e a Lua é de pouco mais de 1 segundo-luz. Por outro lado, a distância média entre a Terra e o Sol é de 146 milhões de km; em outras palavras, ela é de pouco mais de 8 minutos-luz. Essa distância média entre a Terra e o Sol é chamada de Unidade Astronômica (UA).

O gigante Júpiter (Atlas, imagem 10), de tamanho 11 vezes maior que o da Terra, está a uma distância 5 vezes maior que aquela entre a Terra e o Sol, ou seja, dizemos que Júpiter está a 5 UA do Sol. Saturno (Atlas, imagem 11), o segundo planeta em tamanho (9 vezes o da Terra) e com um espetacular sistema de anéis, está a cerca de 10 UA do Sol. Plutão é o planeta que está, em média, mais distante do Sol, cerca de 40 vezes mais distante do Sol que a Terra; assim, a luz da nossa estrela demora 5,5 horas para percorrer as 40 UA até ele. Nos limites do Sistema

Solar está a região de onde se originam os cometas, cerca de 100 000 vezes mais distante do Sol do que a Terra. Essa distância é percorrida pela luz em um ano e meio e, portanto, equivale a uma distância de 1,5 ano-luz do Sol.

AS ESTRELAS MAIS PRÓXIMAS

A uns 4 anos-luz do Sol, está α (= Alfa) Centauri, a estrela mais próxima de nós. α Centauri está 20 000 vezes mais distante do Sol que Saturno. Ou seja, primeiro tivemos de multiplicar a distância da Terra ao Sol por 10 vezes até Saturno; até α Cen, temos agora que nos afastar do Sol multiplicando esta última distância por 20 000. α Cen é, na realidade, um sistema estelar triplo: duas estrelas de brilho semelhante (α Cen A e B) e uma terceira (Próxima Centauri), bem mais fraca e afastada das outras duas. α Cen A e B são facilmente distinguíveis mesmo com uma luneta ou telescópio pequenos e formam um belíssimo par. As estrelas binárias são extremamente importantes pois elas nos permitem determinar a massa de suas componentes. A massa é a propriedade física mais importante de uma estrela.

Como podemos estimar a distância até α Cen? A luz emitida por um objeto espalha-se em todas as direções fazendo com que, longe do objeto, seu brilho observado diminua com o aumento da distância até ele; esse é o caso quando observamos os postes de iluminação mais distantes ao longo de uma rua. Se dobrarmos a nossa distância até uma lâmpada, seu brilho observado diminuirá de 4 vezes. Se a mesma lâmpada estiver 10 vezes mais distante, seu brilho aparente será $10 \times 10 = 100$ vezes menos intenso.

α Centauri é uma das estrelas mais brilhantes do céu, e pode ser vista melhor no outono, no prolongamento leste do braço menor do Cruzeiro do Sul: primeiro você encontrará β Cen, outra estrela dupla brilhante, e em seguida α Cen. α Cen A é uma estrela semelhante ao Sol mas cujo brilho aparente é cerca de 40 bilhões de vezes menor que o que recebemos do Sol. Como elas são semelhantes, podemos achar a distância até α Cen, ou seja, tal distância multiplicada por si mesma deve ser de 40 bilhões. O número que satisfaz isso é 200 000 ($200\,000 \times 200\,000 = 40\,000\,000\,000 = 40$ bilhões), ou seja, α Cen está 200 000 vezes mais distante que o Sol, isto é, aproximadamente 3 anos-luz. A distância correta é, na verdade, 4,3 anos-luz.

As estrelas mais fracas a olho nu têm brilho aparente cerca de 400 vezes mais fraco que α Cen, ou seja, se elas forem semelhantes ao Sol, estarão cerca de 20 vezes mais distantes que α Cen. Isto nos dá uma pálida idéia das distâncias no nosso sistema estelar, a Galáxia. Num raio de 17 anos-luz do Sol, são conhecidas umas 50 estrelas.

As distâncias às estrelas mais próximas podem ser determinadas mais ou menos diretamente através da chamada paralaxe anual. À medida que a Terra se move ao redor do Sol, ao longo do ano, vemos um deslocamento aparente das estrelas mais próximas comparadas com as mais distantes. Você pode entender essa técnica estendendo seu dedo indicador para cima, com o braço esticado horizontalmente à frente do seu rosto; abrindo ora um, ora outro olho, você verá seu dedo projetado ora contra uma, ora contra outra parte da paisagem mais distante ao fundo. Seus olhos fazem o papel da Terra em dois pontos da sua trajetória observando uma estrela próxima (seu dedo) contra as estrelas de fundo (a paisagem). Este ângulo assim medido para as estrelas desde a órbita da Terra é extremamente pequeno; para a estrela mais próxima, α Cen, ele é equivalente a medir-se a largura de uma moeda de 2 cm, a 5 km de distância. Este método direto de determinação de distâncias só pode ser utilizado para estrelas até uns 300 anos-luz do Sol.

Para objetos mais distantes, usamos o fato de que o brilho aparente de uma estrela medido na Terra depende de quanta radiação ela emite por segundo em todas as direções (ou seja, sua luminosidade) e que o brilho aparente cai com o inverso do quadrado da distância da estrela, como exemplificado acima para α Cen A. No caso de α Cen A, ela tem a mesma luminosidade do Sol, já que são estrelas semelhantes, de modo que a diferença de brilho observada entre o Sol e α Cen A é devida somente às diferentes distâncias destas duas estrelas até nós.

Consideremos a estrela da constelação do Cão Maior chamada Sirius (α Canis Majoris), a estrela mais brilhante do céu. Ela está próxima à constelação de Orion, no prolongamento leste das "Três Marias". Sirius está a 8,6 anos-luz de nós, ou seja, 550 000 vezes mais distante que o Sol. Além disso, o brilho de Sirius que recebemos na Terra é cerca de 10 bilhões de vezes menor que o do Sol. Se Sirius tivesse a mesma luminosidade que o Sol, deveria ser $550\,000 \times 550\,000 = 300$ bilhões de vezes mais fraca que o Sol; como ela só parece 10 bilhões de vezes mais fraca, concluímos que Sirius deve ser $300/10 = 30$ vezes mais luminosa que o Sol. Assim, podemos calcular a luminosidade das estrelas conhecendo sua distância e seu brilho aparente. Conhecemos no Universo tanto estrelas com luminosidade mais de 100 000 vezes maior que a do Sol, quanto centenas de milhares de vezes menos luminosas.

A NOSSA GALÁXIA

Vamos agora nos afastar da nossa estrela mais próxima, α Cen, por um fator de 30 000 vezes a distância entre ela e o Sol, 4,3 anos-luz. Agora, temos

outra visão bem diferente: em vez de estrelas separadas umas das outras, vemos o imponente conjunto de estrelas que forma a nossa Galáxia.

O Sol e as estrelas mais próximas encontram-se a aproximadamente 30 000 anos-luz do centro desse sistema estelar do qual fazemos parte. Este sistema é a nossa Galáxia, usualmente denominada de Via Láctea (Atlas, imagem 12), e que contém em torno de 100 bilhões de estrelas. A distribuição das estrelas na nossa Galáxia é principalmente sob a forma de um disco que possui um movimento de rotação em torno do seu centro. A velocidade do Sol e das estrelas da sua vizinhança em torno desse centro é de 250 km s^{-1} , completando uma volta a cada 250 milhões de anos. Este é um tempo relativamente curto comparado com a idade do Sistema Solar, formado em torno de 5 bilhões de anos atrás.

O tamanho aproximado do disco da Galáxia é de 100 000 anos-luz. A forma predominante achatada da nossa Galáxia é evidente quando, em noites de inverno claras e sem luar, nos deparamos no céu com uma faixa de estrelas, a Via Láctea, visão que é resultado de nossa posição particular na Galáxia, ou seja, o Sol está situado no disco de nosso sistema estelar. Quando olhamos ao longo do disco, vemos um número maior de estrelas do que quando olhamos para fora do plano da Galáxia.

Se você olhar com atenção para a Via Láctea, você vai ver que ela não é uniforme mas têm grandes zonas escuras: elas são o resultado da ação da poeira interestelar, grãos sólidos com um milésimo de milímetro ou menos cada um, que absorvem a luz das estrelas mais distantes ao longo do disco da Galáxia. Um exemplo de uma nuvem escura é o Saco de Carvão, junto ao Cruzeiro do Sul e ao sudeste da cruz. Essa poeira, junto com o gás interestelar, constitui o material a partir do qual as estrelas se formam. Em nossa opinião, a visão a olho nu da região central da Via Láctea (na direção das constelações de Escorpião e Sagitário), que pode ser obtida em uma noite de inverno sem luar e longe da luz das cidades, é absolutamente grandiosa. Ao olharmos as estrelas e as nuvens escuras, temos a nítida impressão de estarmos tripulando nosso planeta através do espaço interestelar. Tente e verifique você mesmo!

Outros exemplos interessantes de regiões do meio interestelar em que estrelas estão se formando são a Nebulosa da Águia (Atlas, imagem 13) e a Nebulosa de Orion (Atlas, imagem 14). Lembra-se das chamadas "Três Marias", vistas durante as noites de verão? Pois bem, elas fazem parte da constelação de Orion, que tem pelo menos quatro estrelas bem brilhantes num retângulo contendo as "Três Marias" no centro; estas formam o "cinturão" do caçador mitológico. Descendo para o sul, quase perpendicularmente às três estrelas, encontramos a olho nu uma pequena mancha luminosa, que é a Nebulosa de Orion. Ela é formada por gases incandescentes que são aquecidos por estrelas que se formaram do mesmo gás. Estas estrelas são bem mais quentes e luminosas e de

maior massa que o Sol e existem há alguns milhões de anos apenas, devendo ter uma vida relativamente curta comparada com a do Sol. O tamanho da nebulosa de Orion é de 15 anos-luz, a uns 1 200 anos-luz do Sol.

Nossa Galáxia apresenta ainda vários outros tipos de estrelas, indicativos dos vários estágios da vida de uma estrela. A evolução de uma dada estrela depende principalmente de sua massa. Rigel, por exemplo, que é a estrela mais brilhante da constelação de Orion, aparece como branca-azulada devido à sua alta temperatura superficial, que é de 13 000 graus. Sua luminosidade é cerca de 27 000 vezes maior que a do Sol, o que é devido, além de sua temperatura maior, ao seu raio, cerca de 40 vezes o do Sol. Rigel é considerada uma supergigante azul. Ela se encontra a uns 800 anos-luz de nós; estrelas supergigantes são comparativamente mais raras na Galáxia que estrelas menos luminosas e de menor massa. A massa de Rigel é dezenas de vezes a massa do Sol. Como sua luminosidade é bem maior que a do Sol, ela deverá evoluir muito mais rapidamente que este. Ao longo de suas vidas, as estrelas normalmente ejetam massa de volta para o meio interestelar; uma estrela que ainda possua várias massas solares ao fim de sua evolução acabará seus dias na explosão espetacular de uma supernova, como aquela observada na Grande Nuvem de Magalhães, em 1987 (Atlas, imagem 17).

Na mesma constelação de Orion, diagonalmente oposta a Rigel e para o sul, encontramos Betelgeuse, a segunda estrela mais brilhante da constelação e que parece nitidamente avermelhada a olho nu. Sua temperatura superficial é de cerca de 3 000 graus e seu tamanho é cerca de mil (!) vezes o do Sol; se colocada no lugar deste, ela engolfaria a órbita de Júpiter. O Sol, dentro de alguns bilhões de anos, também deverá se tornar uma gigante vermelha, embora algo menor, mas ainda assim com um tamanho dezenas de vezes maior que o atual. Não vai adiantar ir à farmácia comprar creme de proteção com fator 2000. A temperatura na Terra subirá muito e a vida em nosso planeta já terá deixado de existir.

Sirius, por outro lado, tem uma companheira denominada Sirius B, que possui uma luminosidade 20 vezes menor que a do Sol, mas que é bem mais quente que ele. A única maneira disto ser possível é que Sirius B seja bem pequena: efetivamente, ela tem cerca de 10 000 km de diâmetro apenas, semelhante ao da Terra. Tais estrelas são, com justiça, chamadas anãs brancas. O mais interessante é que Sirius B tem aproximadamente a mesma massa do Sol, significando que a matéria em Sirius B tem densidade extremamente alta: um volume equivalente ao de uma caixa de fósforos em Sirius B conteria uma massa de cerca de 10 toneladas. As anãs brancas são o destino final da evolução de estrelas de pequena massa como o Sol (Atlas, imagens 18 e 20).

A alta densidade de uma anã branca é, por incrível que possa parecer, relativamente pequena se comparada com as estrelas de nêutrons, descobertas em 1967: seu raio é de apenas uma dezena de quilômetros! (capítulo 8). Com massa

comparável à do Sol, o mesmo volume de uma caixa de fósforos teria 10 bilhões de toneladas – o mesmo que o de uma montanha terrestre! As estrelas de nêutrons são um dos restos possíveis da explosão de uma supernova; o outro tipo de remanescente possível, de acordo com a massa que sobrar da explosão, é um buraco negro.

Nossa Galáxia tem ainda estrelas bem mais velhas que o Sol. Um exemplo são aquelas em aglomerados globulares, conjuntos que possuem entre 100 000 e 1 milhão de estrelas e com aparência esférica (Atlas, imagem 19). Estes aglomerados de estrelas orbitam ao redor do centro da Galáxia mas fora do disco dela e se formaram há mais de 10 bilhões de anos atrás, quando a Galáxia era bem mais jovem.

A GALÁXIA E SUAS VIZINHAS: O GRUPO LOCAL

Vamos nos afastar agora da nossa Galáxia por mais um fator igual a 50 vezes o seu tamanho. Agora, vemos que nossa Galáxia não está isolada.

Nossa Galáxia faz parte de um aglomerado de galáxias, denominado Grupo Local, contendo trinta ou mais galáxias, entre as quais encontram-se as duas Nuvens de Magalhães, a uns 200 000 anos-luz de nós, e a galáxia de Andrômeda (Atlas, imagem 22), a uma distância de cerca de 2 milhões de anos-luz de nossa Galáxia.

As Nuvens de Magalhães são duas galáxias irregulares bastante próximas a nós e chamadas de Grande e Pequena Nuvem de Magalhães (Atlas, imagem 23). Elas podem ser vistas em noites sem luar, por exemplo, no começo das noites de outubro a dezembro, em direção ao sul. Elas parecem duas massas difusas (daí o nome) e poder vê-las é também um privilégio dos habitantes do hemisfério austral. Com um pouco de esforço, consegue-se ver a olho nu na Grande Nuvem, em uma das extremidades, uma mancha mais brilhante do que o resto daquela galáxia: é a Nebulosa da Tarântula, cujo nome é devido à sua aparência ao telescópio. Ela é, como a Nebulosa de Orion, uma região com intensa formação de estrelas. Entretanto, ela é bem maior; se colocada à mesma distância do Sol que a Nebulosa de Orion, a Tarântula ocuparia no céu toda a constelação de Orion!

A galáxia de maior tamanho do Grupo Local é a galáxia de Andrômeda. A distância entre ela e a nossa Galáxia é de aproximadamente 30 vezes o diâmetro desta última. A constelação de Andrômeda é melhor vista do hemisfério norte.

A galáxia de Andrômeda é bastante semelhante à nossa e as duas são exemplos de galáxias espirais (Atlas, imagem 24). Algumas galáxias espirais podem apresentar uma barra central, de onde saem os braços espirais (Atlas,

imagem 25). As galáxias podem ser também de tipo elípticas, que são sistemas que não contêm discos (Atlas, imagem 26). O conjunto de estrelas nesses casos formam um grande elipsóide.

Existem ainda galáxias que têm em seu núcleo uma atividade muito intensa. Um exemplo são as chamadas galáxias Seyfert (Atlas, imagem 28), em que, numa foto de curta exposição, apenas seu núcleo aparece; a galáxia espiral em si aparece somente em exposições mais longas. O exemplo mais dramático destes núcleos ativos de galáxias são os quasares: seu núcleo é cerca de 1000 vezes mais brilhante que a galáxia em que ele se situa. Os quasares são as fontes de energia mais intensas no Universo e podem ser vistos a enormes distâncias, alguns deles a dezenas de bilhões (!) de anos-luz da nossa Galáxia. Aparentemente, os quasares (capítulo 11) produzem, numa região interna menor que o Sistema Solar, energia equivalente a 10 trilhões de sóis! As evidências apontam para a existência de um buraco negro no centro dos quasares e galáxias em formação com massa entre um milhão e um bilhão de massas solares e que captura matéria sob a forma de um disco ao seu redor. Nossa própria Galáxia também tem um buraco negro no seu centro, com aproximadamente 3 milhões de massas solares.

OS AGLOMERADOS DE GALÁXIAS E O UNIVERSO

Vimos que nossa Galáxia é parte de um grupo, ou aglomerado, de galáxias, grupo Local. Vimos também que para perceber esse grupo devemos nos afastar por uma distância da ordem de 50 vezes o tamanho da nossa Galáxia. A maioria das galáxias, ou pelo menos metade delas, fazem parte ou de grupos ou de aglomerados (grupos maiores de galáxias que podem ter até milhares de componentes). Esses aglomerados são um fenômeno bastante comum no Universo (Atlas, imagem 31).

Os levantamentos feitos sobre a distribuição de galáxias no Universo mostram um fato interessante: essa distribuição está longe de ser uniforme. As galáxias estão distribuídas no Universo formando filamentos e superfícies envolvendo grandes buracos vazios, e os aglomerados são um aumento local na densidade de galáxias. Uma descrição apropriada para o Universo é a de uma enorme esponja. As galáxias, o material da esponja, estão todas conectadas, com os vazios sendo os buracos da esponja e os aglomerados ricos nos vértices internos da esponja. O tamanho dos vazios de galáxias observados é da ordem de 100 vezes o tamanho de um aglomerado de galáxias. Descrever o porquê desta estrutura é um dos grandes desafios da Cosmologia hoje.

Outro aspecto cosmológico que nos permite entender a estrutura do Universo é a densidade de energia, sob a forma de matéria ou outra forma qualquer, que existe atualmente. A observação da rotação de galáxias individuais e do movimento de galáxias em aglomerados indicam um fato notável: as galáxias possuem muito mais matéria que a que podemos ver. A matéria feita de átomos como os do nosso corpo (chamada bariônica) e que pode ser vista (ou seja, que emite algum tipo de luz ou radiação) é uma fração muito pequena, uns 0,5%, da energia total do Universo. Ela é, além disso, somente uns 10% da matéria bariônica total, que perfaz assim só 5% da energia total do Universo. Como está constituída esta matéria bariônica escura? Possivelmente está sob a forma de estrelas de baixo brilho, planetas etc., mas ainda não sabemos com certeza.

E isto é só o começo. Para explicar as estruturas do Universo mencionadas no início desta seção, os modelos cosmológicos mostram que o total da matéria não pode ultrapassar a 35% da energia total do Universo. Ou seja, 5% desta energia vem da matéria bariônica e 30% vem de matéria que não é visível de modo algum: é a chamada matéria (não-bariônica) escura. Do que é feita esta matéria? Ela é prevista em algumas teorias de partículas elementares. Alguns experimentos subterrâneos (para evitar contaminação pelos raios cósmicos) estão em andamento para tentar detectar estas partículas, assim como futuros aceleradores de partículas tentarão produzi-las em laboratório.

O tamanho do Universo, como o observamos hoje, é umas 50 vezes o tamanho de um destes vazios na distribuição de galáxias. Ou seja, existem galáxias semelhantes à nossa a uma distância maior que essa, mas a luz delas ainda não chegou até nós.

O Universo nem sempre foi igual ao que vemos hoje. Quando observamos galáxias e quasares cada vez mais distantes, vemos que eles estão se afastando de nós; quanto mais longe, mais rápido vemos as galáxias se afastarem (Atlas, imagem 32). Na verdade, qualquer outra galáxia vê o resto do Universo afastar-se dela, de modo muito semelhante a um bolo (o Universo) no forno crescendo e com passas no recheio (as galáxias) se afastando umas das outras. Cada passa vê as outras se afastarem com velocidade proporcional à distância entre elas. Hoje acreditamos que a expansão do Universo seja resultado de uma explosão inicial, chamada apropriadamente de *Big Bang*, que teria ocorrido há uns 15 bilhões de anos atrás. Assim, quando observamos quasares e galáxias em formação (com, por exemplo, o telescópio espacial Hubble) distantes bilhões de anos-luz de nós, estamos na verdade vendo o Universo como ele era no passado, diferente de como ele é hoje.

RETROSPECTIVA

Chegamos assim ao final (ou ao começo?) de nossa viagem pelo Universo. Saímos de nossas vizinhanças no Sistema Solar, onde a Lua dista 1 segundo-luz de nós e a Terra, 8 minutos-luz do Sol. Passamos por Saturno, 10 vezes mais distante do Sol que a Terra. Passamos pelas estrelas mais próximas, 20 000 vezes a distância Sol-Saturno e daí, através de outro salto de 30 000 vezes, fomos admirar nosso sistema estelar, a Galáxia. Viajamos 50 vezes o tamanho da Galáxia para verificar o tamanho dos aglomerados de galáxias. Outro fator de 50, nos levou às grandes estruturas do Universo, como os vazios encontrados entre as galáxias. Mais um fator de 50 e chegamos ao limiar do Universo da maneira como o vemos hoje. Além daí, vimos os quasares, já olhando o Universo como ele era há vários bilhões de anos.

Qual o destino do Universo? As observações em microondas da radiação proveniente do *Big Bang* mostram que o Universo como um todo tem a geometria euclidiana, ou seja, o Universo é plano, como na nossa experiência diária (!). Isto significa que ele tem exatamente a densidade de energia necessária para continuar se expandindo indefinidamente, ou melhor, parar de se expandir somente após um tempo infinito. Vimos acima que a matéria, bariônica ou não, é somente capaz de fornecer 35% desta energia. Os 65% restantes, acredita-se, provêm de alguma forma de energia “escura” denominada, mais por desconhecimento nosso que por outro motivo, de “quinta essência”. Na verdade, na segunda década do século XX, Einstein havia sugerido a existência de algo parecido, chamado então por ele de constante cosmológica, cuja repulsão pudesse contrabalançar a gravidade, sempre atrativa. O mais interessante é que observações recentes de supernovas parecem indicar que a expansão do Universo está efetivamente se desacelerando, como seria de se esperar de uma repulsão cuja contribuição à densidade de energia do Universo seria exatamente de 65%. Esta evidência, independente, contribui para apoiar a noção de que a quinta essência, o que quer que ela seja, realmente exista.

Assim, por incrível que possa parecer, sabemos por um lado que a maior parte da energia, material ou não, do Universo é, na verdade, ainda desconhecida, o que não nos impede de saber, por outro lado, como é a estrutura do nosso Universo em grande escala, fato que é ainda mais incrível!