

Guia de estudos “Astrofísica Estelar para o Ensino Médio”

Capítulo 1 – Muito além do Sistema Solar

1.1 Introdução

O que é uma estrela? Por que as estrelas brilham? A que distâncias se encontram? Qual o seu tempo de vida? Como é possível conhecermos suas características, como massas, dimensões, luminosidades, temperaturas, idades ou composições químicas? Sabemos que – ao contrário do que ocorre com outras ciências, como, por exemplo, a Biologia ou a Mineralogia – para estudarmos as estrelas não dispomos de fósseis ou de amostras que possam ser analisadas ou testadas em laboratório. E há ainda outras limitações: além das imensas distâncias às quais as estrelas se encontram, os seus interiores estão totalmente inacessíveis à observação direta. De que forma, então, conseguimos estudar as estrelas? Embora muitas dessas perguntas já venham sendo feitas há milênios por nossos antepassados ao contemplar aqueles pontos luminosos no céu noturno, foi só há menos de dois séculos, com o desenvolvimento da Astrofísica, que começamos a respondê-las.

A Física das estrelas – ou Astrofísica Estelar – é essencial para compreendermos o Universo, suas origens e seu provável destino. Seu estudo nos permite também entender questões fundamentais do dia a dia, como a produção de energia que permite a vida em nosso planeta, ou a origem dos elementos químicos que constituem a matéria de nossos corpos e de tudo o que nos cerca.

Embora à primeira vista esse estudo possa parecer complexo, inacessível ou privilégio dos grandes observatórios e dos pesquisadores teóricos, é perfeitamente possível, através de uma abordagem empírica baseada na observação visual regular do céu (em particular, de uma classe de estrelas chamadas “estrelas variáveis”), com instrumentos modestos e suplementada pela matemática do Ensino Médio, a construção de um quadro básico sobre a Astrofísica Estelar. Esse é o propósito do presente trabalho.

Neste primeiro capítulo, iniciaremos fornecendo o contexto histórico no qual a Astrofísica Estelar se desenvolveu desde meados do século XIX. A seguir, procuraremos responder à questão “onde as estrelas se encontram?”, introduzindo uma noção das distâncias astronômicas, representadas inicialmente a partir de um modelo em escala do Sistema Solar, ampliado a seguir para as estrelas da Via Láctea. São apresentadas as unidades de medida de distâncias astronômicas, bem como a indispensável notação científica. Ao final do capítulo, são propostas diversas atividades didáticas, discussões em sala e exercícios para visualizar as escalas (espacial e temporal) do Universo.

1.2 Uma breve história da Astrofísica Estelar

Costuma-se dizer com frequência que a Astronomia é a mais antiga das ciências, e isso provavelmente é bem verdadeiro. Datam de mais de cinco mil anos atrás as evidências dos primeiros calendários astronômicos no Egito e na Suméria, e há indícios de que, muito antes disso (ainda no início do período Neolítico), nossos ancestrais pré-históricos já conheciam certos fenômenos celestes, sabendo mesmo se orientar e estimar a hora do dia pela altura do Sol sobre o horizonte. É provável que a Astronomia antiga tenha nascido por necessidades práticas de sobrevivência desses homens primitivos (PANNEKOEK, 1989, p. 19-22). No entanto, esse tradicional ramo da Astronomia (que conhecemos hoje como Astronomia Fundamental, ou Astronomia de Posição) tem como objetivo apenas medir as posições e os movimentos dos astros; nada se questiona ou se infere sobre sua natureza intrínseca, física ou química. Foi exatamente sob essa forma e com essas limitações que a Astronomia atravessou a Antiguidade, a Idade Média e até mesmo a Renascença. Na verdade, até fins do século XVIII quase nada se sabia sobre a real natureza das estrelas ou do próprio Universo.

Nada do que foi dito até agora se aplica à Astrofísica. Ao contrário da Astronomia Fundamental, a Astrofísica é uma ciência muito recente, com menos de dois séculos de existência. Seu desenvolvimento se iniciou na primeira metade do século XIX, e desde então tem se acelerado de forma quase vertiginosa. Foi a Astrofísica que nos permitiu enfim alargar nosso conhecimento sobre o Universo e suas fronteiras. Desde então podemos ver, combinadas e trabalhando conjuntamente, as ciências da Física teórica e da observação astronômica (com uma boa dose de ajuda da tecnologia emergente à época da Revolução Industrial). Essa sinergia entre teoria e experimentação, aliás, é a própria essência do método científico: essas são as duas pernas sobre as quais a Ciência caminha.

Até inícios do século XIX, o estudo das chamadas “estrelas fixas” era relegado a segundo plano, não atraindo muito a atenção dos astrônomos da época. Por muitos séculos, elas foram consideradas apenas como uma espécie de “pano de fundo”, contra o qual os astrônomos antigos podiam medir as posições e movimentos da Lua e dos planetas – que era o que realmente lhes interessava. Eventualmente, algumas poucas estrelas apresentavam mudanças periódicas de brilho, que eram percebidas por observadores isolados, porém sem despertar grande surpresa ou interesse: entre essas, a estrela Omicron Ceti (também chamada de “Mira”, ou “a Maravilhosa”), foi observada por David Fabricius (1564-1617) em 1596 e depois por Johann Holwarda (1618-1651) em 1638; em ambos os casos, a estrela havia passado de facilmente observável para a invisibilidade em poucos meses. Outra delas, Beta Persei (que conhecemos também como “Algol”, ou a “Estrela do Demônio” em árabe) teve suas variações de brilho, que se dão a cada três dias, registradas em 1672 por Geminiano Montanari, em Bolonha. Onze dessas estrelas (que hoje denominamos “estrelas

variáveis”) haviam sido identificadas até o fim do século XVIII (HOFFLEIT, 1997). Porém, por mais estranho que pareça, nenhuma havia despertado interesse suficiente para estimular sua observação regular e sistemática, com a finalidade de compreender as razões de sua variação de brilho. E, além das duas “estrelas novas” (fenômeno que hoje conhecemos por supernovas) que haviam sido observadas por Tycho Brahe (1546-1601) no ano de 1572 e por Johannes Kepler (1571-1630) em 1604, isso era praticamente tudo o que se sabia sobre tais estrelas.

Um dos mais importantes precursores da Astrofísica Observacional foi um músico e astrônomo amador nascido na Alemanha e emigrado para a Inglaterra aos dezenove anos. Seu nome era William Herschel (1738-1822). Garantindo sua subsistência com o cargo de organista da Octagon Chapel, na cidade inglesa de Bath (HOSKIN, 2011), Herschel dedicava todo o seu tempo disponível (inclusive, segundo a lenda, os intervalos de seus concertos) à observação do céu. Hábil óptico, Herschel construiu dezenas de telescópios, havendo descoberto o planeta Urano com um deles no ano de 1781. Por esse feito, recebeu o título de “Astrônomo de Sua Majestade” e uma bolsa vitalícia do rei George III, o que lhe permitiria abandonar o ofício de músico e mudar-se no ano seguinte para Datchet, e logo a seguir para Slough (ambas pequenas cidades nas proximidades do castelo real de Windsor) para dedicar-se inteiramente à Astronomia. A partir daí e até sua morte (sempre com a ajuda de sua irmã Caroline), William Herschel foi um observador incansável: entre outros feitos, ele descobriu as nebulosas planetárias, objetos que hoje sabemos serem os estágios finais da evolução de estrelas como o Sol; conjecturou sobre essa evolução (na maior parte dos casos, corretamente); mapeou a Via Láctea e estudou sua natureza; identificou a existência da radiação infravermelha; descobriu centenas de estrelas binárias e múltiplas, publicando os três primeiros catálogos desses sistemas estelares em 1782, 1784 e 1821, contendo respectivamente 269, 484 e 145 objetos (MacEVOY, 2011); descobriu e catalogou milhares de objetos difusos como nebulosas, galáxias e aglomerados (conhecidos também pela expressão inglesa *deep sky objects*), publicando em 1786, 1789 e 1802 três catálogos, abrangendo um total de 2.500 desses objetos. Os três catálogos de William Herschel, suplementados pelos 4.021 objetos descobertos posteriormente por seu filho, o não menos notável astrônomo John Herschel (1792-1871), constituiriam a base para a edição, em 1888, por John Louis Emil Dreyer (1852-1926), do *New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars* (NGC), usado amplamente até os dias de hoje (STEINICKE, 2016).

Bem menos conhecida, todavia, é a contribuição fundamental de William Herschel para o desenvolvimento da fotometria visual – a medição precisa dos brilhos aparentes das estrelas. Em uma detalhada análise dos trabalhos científicos de Herschel publicada em 1881, Edward Holden relata:

Nenhuma pesquisa de Herschel foi mais laboriosa do que a elaborada classificação das estrelas de acordo com seus brilhos comparativos, que ele executou entre os anos de 1796 a 1799. Ela estava diretamente em linha com sua obra maior, de desvendar a construção dos céus (HOLDEN, 1881, tradução nossa).

Examinando a metodologia usada por Herschel, não é exagero afirmar que ele lançou as bases da técnica de fotometria visual, que só seriam aperfeiçoadas meio século depois por F.W. Argelander (1799-1875). Uma prova disso veio à tona em 1884, quando Edward Pickering (1846-1919), renomado astrônomo que era então diretor do Harvard College Observatory, comunicou a descoberta de uma série de observações de estrelas variáveis feitas por Herschel entre 1795 e 1797. Pickering escreveu:

É evidente que essas observações formarão daqui para diante um teste muito valioso da correção de qualquer lei presumida, pois em muitos casos elas precedem por mais de meio século qualquer outra observação dessas estrelas com o mesmo grau de precisão (PICKERING, 1884, tradução nossa).

Enquanto Herschel e outros observadores aperfeiçoavam as técnicas de fotometria, outra poderosa ferramenta para entender a natureza das estrelas começava a ser desenvolvida: a espectroscopia. A rigor, a história dessa técnica teve início um século e meio antes: já no ano de 1666, com apenas 24 anos, Sir Isaac Newton (1642-1727), usando um prisma, havia decomposto a luz solar nas suas diversas cores componentes – aquilo a que chamou de espectro¹. Newton elaborou ainda uma teoria sobre a luz baseada em sua natureza corpuscular, apresentando-a em 1672 – que foi refutada por outro gênio da época, o holandês Christiaan Huygens (1629-1695), que propôs que a luz deveria ter uma natureza ondulatória, ao contrário do que Newton postulava. Curiosamente, sabemos hoje que ambas as concepções estavam essencialmente corretas, porém essa controvérsia só seria encerrada no início do século XIX, com os trabalhos de Thomas Young (1773-1829) e Augustin Fresnel (1788-1827). Embora o debate entre os dois gênios tenha sido ameno e respeitoso (MOURA, 2016), Newton abandonaria o estudo da luz poucos anos mais tarde, nunca mais voltando ao assunto. E, talvez também por isso, a espectroscopia teria de esperar ainda cento e cinquenta anos para se desenvolver.

Já no ano de 1814, um jovem óptico alemão, Josef von Fraunhofer (1787-1826), experimentando diversos tipos de prismas de vidro, notou que o espectro do Sol apresentava um grande número de linhas muito finas (mais de 500) que o cruzavam. Intrigado, Fraunhofer tentou múltiplas combinações diferentes de vidros e desenhos de prismas, até concluir finalmente, em 1817, que “as linhas pertencem à natureza da luz solar, e não são causadas por difrações ou aparências” (PANNEKOEK, 1989, p. 330).

¹ Os experimentos de Newton são descritos no Livro I de seu livro *Opticks*, publicado em 1704. Uma tradução dessa obra para o português foi publicada pela Edusp em 1996 (ver Referências bibliográficas).

Fraunhofer era também astrônomo amador, e procurou identificar (com sucesso) linhas em espectros de estrelas brilhantes: Sirius, Castor, Pollux, Capella, Betelgeuse e Procyon; ele notou, entretanto, que a maior parte dessas linhas eram diferentes daquelas do espectro solar, que ele havia medido com cuidado e nomeado de A até K. Vitimado por uma tuberculose, porém, Fraunhofer morreu cedo, e nunca chegou a compreender qual era a causa das linhas espectrais (até hoje chamadas linhas de Fraunhofer) que ele havia observado.

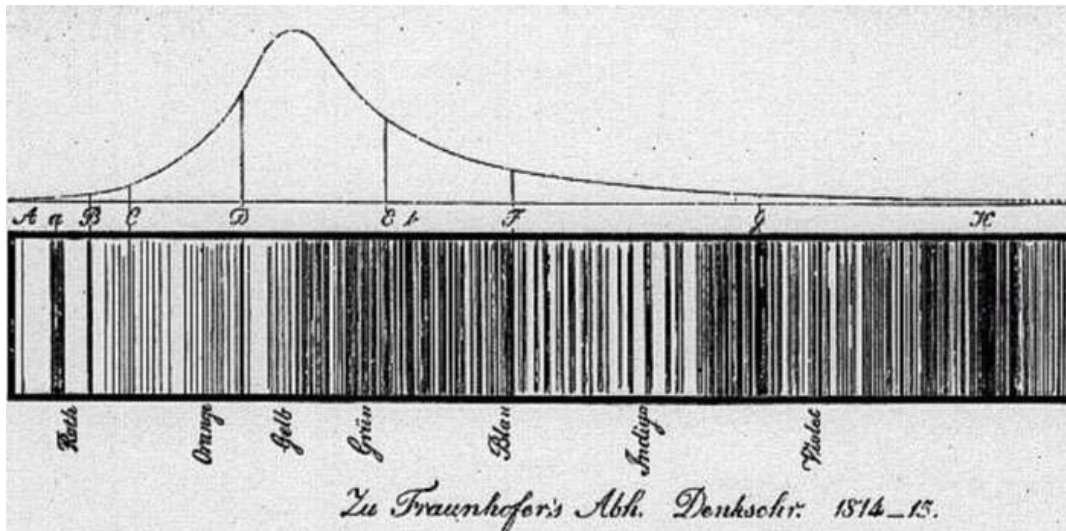


Figura 1.1 – Espectro solar com as linhas de absorção descobertas e nomeadas por Fraunhofer. Na parte superior, a curva mostra a intensidade da luz solar em diversas regiões do espectro. (Desenho original de Fraunhofer, Denkschriften der Münchner Akademie.)

A solução desse enigma estava reservada a um físico teórico e um químico, ambos também alemães: Gustav Kirchhoff (1824-1887) e Robert Bunsen (1811-1899), no ano de 1859. Três anos antes, Bunsen havia inventado um engenhoso bico de gás, hoje conhecido em todos os laboratórios químicos como “bico de Bunsen”, e cuja característica é a mistura do ar com o gás natural na base do queimador, permitindo a obtenção de uma chama azul na base e incolor no topo. Assim, quando se aquece no bico de Bunsen qualquer elemento químico, a cor emitida corresponde ao próprio elemento, e não à chama. Trabalhando em seu laboratório em Potsdam, os dois cientistas tiveram a feliz ideia de passar através de um prisma de vidro a luz emitida por diversos elementos químicos aquecidos pelo bico. E ficaram atônitos com o resultado: o espectro de cada elemento químico mostrava um conjunto de linhas de emissão brilhantes, sempre nos mesmos comprimentos de onda para aquele elemento – formando um padrão único e característico dele. Mas as linhas obtidas por eles no laboratório eram brilhantes (de emissão), enquanto as de Fraunhofer eram escuras (de absorção). Para comparar as linhas de emissão com as de absorção, Kirchhoff passou a luz solar através de vapor de sódio, confirmando que as duas fortes linhas de absorção D1 e D2 do espectro de Fraunhofer eram as mesmas duas linhas brilhantes que

apareciam no espectro de emissão do sódio. Ele repetiria a experiência com linhas de cálcio, magnésio, cromo, cobalto, zinco, ferro, níquel e bário, identificando dessa forma a presença desses elementos no Sol e compreendendo a natureza das linhas de absorção (CLERKE, 1893). Posteriormente, ele identificaria todas as linhas de absorção solar denominadas originalmente por Fraunhofer de A até K. As experiências de Kirchhoff lhe permitiriam também formular suas três leis empíricas da espectroscopia. Estava claro agora para ele o imenso potencial de suas descobertas: era perfeitamente possível determinar a composição química das estrelas. Analisando seus espectros, bastaria identificar as linhas correspondentes aos elementos químicos cujos comprimentos de onda haviam sido previamente medidos em laboratório: a presença das linhas (as “impressões digitais”) de algum deles no espectro indicaria que aquele elemento existia na estrela. A ligação entre a física na Terra e a luz das estrelas tinha sido estabelecida, e o caminho para o desenvolvimento da Astrofísica Estelar estava finalmente aberto.

Daí para diante, as descobertas se sucederam vertiginosamente: além dos próprios Kirchhoff e Bunsen, vários astrônomos passaram a trabalhar com a recém-nascida ferramenta da análise espectral. Entre eles estavam, em especial, Sir William Huggins (1824-1910), na Inglaterra, e o padre jesuíta Angelo Secchi (1818-1878), no Observatório do Vaticano. Huggins, trabalhando com sua esposa, Lady Margaret Lindsay Huggins (1848-1915), identificou, já em 1862, a presença de ferro, magnésio, sódio, cálcio e bismuto nas estrelas Aldebaran e Betelgeuse; em 1864, obteve o primeiro espectro de uma nebulosa planetária. Em 1868, observando Sirius, o casal Huggins notou que as linhas espectrais apresentavam desvio para o vermelho, e propôs que o desvio poderia ser usado para medir a velocidade radial da estrela. Eles ainda estabeleceram a primeira distinção entre nebulosas e galáxias, ao mostrar que algumas das então chamadas “nebulosas” (como a Nebulosa de Orion) possuem espectros de emissão pura característicos de gás, enquanto outras, como a Galáxia de Andrômeda, têm as características espectrais de estrelas (BECKER, 1993).

No Observatório do Vaticano, o padre Angelo Secchi, entre 1863 e 1868, dedica-se a um vastíssimo trabalho de identificação de linhas espectrais em nada menos que quatro mil estrelas, classificando-as posteriormente em quatro tipos básicos e alguns intermediários. O trabalho do padre Secchi foi a base para a classificação espectral moderna, sendo ampliado drasticamente nos anos seguintes por Edward Pickering e sua fabulosa equipe de jovens astrônomas do Harvard College Observatory, que executaram o gigantesco trabalho de analisar, espectro por espectro, fotografia por fotografia, as linhas espectrais de centenas de milhares de estrelas e classificá-las (inicialmente partindo dos critérios de Secchi). Entre essas talentosas jovens estavam Williamina Fleming (1857-1911), Henrietta Swan Leavitt (1868-1921), Antonia Maury (1866-1952) e Annie Jump Cannon (1863-1941). Em capítulos posteriores, poderemos

avaliar a imensa importância dos trabalhos dessas mulheres para o desenvolvimento da Astrofísica contemporânea.

Antes do fim do século XIX, o grupo de Harvard já havia determinado os parâmetros de mais de dez mil estrelas; em 1924, nada menos que 225.300 estrelas, consolidadas no *Henry Draper Catalogue (HD)*, que foi o primeiro catálogo espectral em grande escala e a origem da classificação espectral moderna, usada até os dias de hoje. A Astrofísica Estelar enfim estava atingindo sua plenitude.

Nas décadas que se seguiram e durante todo o século XX, os trabalhos de brilhantes físicos teóricos como Max Planck (1858-1949), Albert Einstein (1879-1955), Ernest Rutherford (1871-1937), Niels Bohr (1885-1962), Erwin Schrödinger (1887-1961), Werner Heisenberg (1901-1976) e muitos outros se uniram aos de eminentes astrônomos observacionais como Harlow Shapley (1885-1972), Ejnar Hertzsprung (1873-1967), Jan Oort (1900-1992), Henry Norris Russell (1877-1957) e Edwin Hubble (1889-1953) para desvendar não só os segredos das estrelas, mas também os das galáxias e do próprio Universo – desde a escala cosmológica até a atômica. A Astrofísica se consolidava e se aliava a outras grandes vertentes da Física moderna, como a Teoria da Relatividade, a Física de Partículas e a Mecânica Quântica, para construir o imenso edifício da Física contemporânea. Nos próximos capítulos, iremos estudar, de forma simplificada, algumas das conclusões que esses grandes cientistas nos legaram, tendo as estrelas variáveis como nossas guias. Porém, antes disso, vamos tentar visualizar as distâncias reais às quais as estrelas se encontram.

1.3 Um modelo do Sistema Solar... e além!

Não é necessário ser um astrônomo profissional para imaginar que o Universo é um lugar *realmente grande*: nosso senso comum já indica isso, quando observamos o céu noturno. Mesmo para o leigo, a Lua, os planetas e as estrelas que vemos nos parecem estar muito distantes. Mas uma pergunta nos vem de imediato: quão distantes estão esses astros? Quais as dimensões do Universo conhecido? Como podemos visualizar essas dimensões usando apenas nossa percepção do dia a dia?

Uma primeira ideia seria construirmos um modelo, em uma escala compatível com as dimensões às quais estamos familiarizados em nossa vida cotidiana, na qual a maior parte dos objetos e distâncias é medida em centímetros, metros ou quilômetros. Alguns exemplos: os populares carrinhos de brinquedo para crianças são geralmente construídos em escalas que variam entre 1:18 e 1:72. Já as grandes maquetes urbanas, que representam toda uma cidade, usam escalas que vão até 1:5.000 ou mais!²

² Ver, por exemplo, a gigantesca maquete de Shangai existente no Shanghai Urban Planning Exhibition Center (Centro de Exposições de Planejamento Urbano) dessa cidade, que foi construída em uma escala de 1:7.000. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Shanghai_Urban_Planning_Exhibition_Center>. Acesso em: 15 de março de 2017.

Que escala usaríamos para nosso modelo? Podemos pensar, por exemplo, em representar nosso Sol por uma pequena esfera com diâmetro de 14 cm (pouco menor que a palma da mão de um adulto, ou mais ou menos do tamanho de uma bola de futebol de salão). Por que essa medida? Ora, sabemos que o diâmetro solar real é de cerca de 1,4 milhões de km (ou 140.000.000.000 cm)³. Nessas condições, nossa escala seria dada pela divisão 14 cm / 140.000.000.000 cm, ou seja, um para dez bilhões!

Bem, à primeira vista, isso parece conveniente: nessa escala, os planetas menores (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte) teriam suas dimensões entre as de um grão de poeira e um grão de areia. Júpiter, o maior dos planetas, teria um diâmetro pouco maior que o de uma moeda de um centavo. Tentemos visualizar agora como seriam representadas em nosso modelo algumas distâncias astronômicas, iniciando por nossa vizinhança – o Sistema Solar. Imaginemos uma caminhada, a partir do nosso pequeno “Sol” de 14 cm, até cada um dos “planetas” do modelo (os minúsculos grãos de poeira ou de areia). O roteiro desse passeio seria visto na tabela a seguir:

Planeta	Distância média ao Sol (km)	Distância no modelo (m)
Mercúrio	57.900.000	5,8
Vênus	108.200.000	10,8
Terra	149.600.000	15,0
Marte	227.900.000	22,8
Júpiter	778.600.000	77,8
Saturno	1.433.500.000	143,3
Urano	2.872.500.000	287,2
Netuno	4.495.100.000	449,5

Tabela 1.1 – Distâncias médias reais de cada planeta ao Sol e suas representações no modelo em escala de um para dez bilhões. (Fonte: <<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>>.)

Até aqui, as coisas não parecem tão mal assim, ao menos com a nossa escala de um para dez bilhões: se quiséssemos caminhar desde nosso pequeno “Sol” até o último

³ O valor preciso atual do diâmetro solar, aceito pela União Astronômica Internacional, é de 1.391.400 km.

dos “planetas” do modelo que construímos, teríamos de percorrer menos de 500 metros... Não é preciso ser um atleta para isso, afinal!

No entanto, nosso entusiasmo nesse passeio ao longo do nosso modelo desaparecerá instantaneamente se resolvermos caminhar agora até a representação da estrela mais próxima do Sol: Alfa Centauri (que é na verdade um sistema triplo, e cuja componente menor chama-se, não sem motivo, Proxima Centauri). Essa estrela se encontra à distância real de 40.200.000.000.000 km (mais de quarenta trilhões de quilômetros). Mesmo na escala de nosso modelo, teríamos de caminhar mais de *quatro mil quilômetros* (algo como a distância entre São Paulo e Caracas, na Venezuela) para atingir a pequena esfera de 4 cm que representaria Proxima Centauri. Porém, essa é apenas a nossa estrela *vizinha!* Se viajássemos até Proxima Centauri na maior velocidade que nossas naves espaciais tripuladas atuais permitem (cerca de 40.000 km/h), levaríamos cerca de 115.000 anos até chegar a ela. Já se viajássemos à velocidade máxima de um automóvel em nossas estradas, a viagem levaria nada menos que uns 40 milhões de anos...

A essa altura já percebemos que nosso pobre modelo inicial, que havia funcionado tão bem para o Sistema Solar, tornou-se inútil quando se trata de representar as distâncias entre as estrelas. Mais ainda, já temos certeza que nossas unidades de medida do dia a dia, como centímetros, metros ou quilômetros, são ridiculamente pequenas e totalmente inadequadas para medir distâncias astronômicas. Em lugar delas, em Astronomia, usamos duas importantes unidades para a medida de distâncias: a *unidade astronômica (UA)* e o *ano-luz* (uma terceira unidade, o *parsec*, será apresentada num capítulo posterior). A seguir, as definições dessas unidades.

1.4 Unidades de medida de distâncias astronômicas: a UA e o ano-luz

A *unidade astronômica (UA)* é mais usada para distâncias astronômicas relativamente pequenas, como as encontradas no interior do Sistema Solar. Ela é equivalente à distância média da Terra ao Sol, que é de aproximadamente 149,6 milhões de km⁴. Consideremos um exemplo: a distância média de Saturno ao Sol, que é de 1.433,5 milhões de km pela Tabela 1.1, pode ser expressa em UA por $(1.433.500.000 / 149.600.000) = 9,58$ UA.

Muitas vezes, para efeito de simplificação, a UA é aproximada para 150 milhões de km.

Já o *ano-luz* (que, ao contrário do que poderia parecer, *não* é uma medida de tempo, mas sim de distância) é definido como a distância que a luz percorre no decorrer de um ano, viajando à velocidade de aproximadamente 299.800 km/s no vácuo. Como um ano possui cerca de 31.557.000 segundos, a distância correspondente a um ano-luz

⁴ Na XXVIII Assembleia Geral da União Astronômica Internacional, realizada em 2012 em Beijing (China), o valor oficial preciso da UA foi redefinido como sendo 149.597.870.700 m.

será calculada simplesmente pelo produto da velocidade da luz (em km/s) pelo tempo (em segundos), obtendo-se como resultado cerca de 9.460.000.000.000 km (ou seja, aproximadamente 9,46 trilhões de km). Evidentemente, por ser muito maior que a UA, o ano-luz é preferido para as distâncias estelares, galácticas e extragalácticas. Eventualmente, poderão ser usadas, por conveniência, algumas unidades relacionadas ao ano-luz (ou “unidades-luz”), como o segundo-luz, o minuto-luz ou a hora-luz, e cujas definições são feitas de forma análoga à do ano-luz.⁵

Muitas vezes, para efeito de simplificação, a velocidade da luz é aproximada para 300.000 km/s.

Tendo em mente essas definições, podemos agora esquecer as unidades do dia a dia e representar algumas distâncias astronômicas nessas novas unidades:

Distâncias entre os objetos:	Em UA	Em unidades-luz
Terra-Lua	0,0026	1,3 segundo-luz
Terra-Sol	1	8,3 minutos-luz
Sol-Vênus	0,72	6 minutos-luz
Sol-Netuno	29,9	4,1 horas-luz
Sol-Proxima Centauri	268.142	4,24 anos-luz
Sol-centro da Via Láctea	1.669.562.400	26.400 anos-luz

Tabela 1.2 – Algumas distâncias médias expressas em UA e em “unidades-luz”

1.5 A que distância estão afinal as estrelas?

Em uma noite sem lua e num local escuro, longe da poluição luminosa de nossas cidades, podemos observar milhares de estrelas. Sabemos hoje que todas elas pertencem à Via Láctea, a nossa Galáxia⁶. No entanto, nossa visão não consegue ter a sensação de “profundidade”, ao olharmos para o céu estrelado (a razão para isso está justamente nas imensas distâncias às quais as estrelas se encontram); ao contrário, a percepção é de que as estrelas estão “cravadas” na imensa abóbada celeste, mais ou menos como vemos nas sessões de planetários.

Por outro lado, percebe-se de imediato que algumas estrelas são mais brilhantes e outras, mais apagadas. Nos tempos antigos, imaginava-se que essa diferença se devia exatamente às distâncias às quais elas se encontravam. Há evidências, por exemplo, de que há quase dois mil anos os astrônomos da Índia antiga já identificavam as estrelas como astros semelhantes ao nosso Sol (HORVATH, 2013). Ora, admitindo essa hipótese

⁵ O ano-luz é definido oficialmente pela IAU como a distância percorrida pela luz, viajando no vácuo a uma velocidade de 299.792.458 m/s, durante um ano Juliano (365,25 dias, com 86.400 segundos cada). Assim, o ano-luz equivale precisamente a 9.460.730.472.580.800 m.

⁶ Em Astronomia, quando escrevemos “Galáxia” com a letra G maiúscula, por convenção estamos nos referindo sempre à galáxia na qual vivemos: a Via Láctea.

(o Sol como padrão para todas as estrelas) e pensando empiricamente, ou ainda por analogia com o que ocorre com objetos terrestres, era natural concluir que as estrelas mais brilhantes seriam também as mais próximas, e que as mais apagadas seriam as que se encontravam mais distantes. Até mesmo o grande William Herschel, em fins de século XVIII, ainda considerava válido esse raciocínio (PANNEKOEK, 1989, p. 314). Sabemos hoje que esse conceito tem um problema fundamental: as estrelas *não são todas iguais*. Em consequência, as diferenças entre as suas *luminosidades intrínsecas* (tanto quanto as distâncias) *também são causas* para a diferença dos *brilhos aparentes* que observamos da Terra⁷. Naturalmente, isso criava um grande obstáculo para calcular as distâncias estelares: como seria possível distinguir, por uma observação feita na Terra, qual estrela é *intrinsecamente* mais (ou menos) luminosa? Mais à frente, em outro capítulo, veremos como essa questão foi resolvida pela Astrofísica e como é possível fazer o cálculo das distâncias das estrelas. Mas, antes disso, vamos visualizar, através de um esquema bem mais efetivo que aquele nosso modelo inicial, as distâncias e a distribuição das estrelas em nossa vizinhança galáctica.

Já vimos que a estrela mais próxima de nós (fora o Sol, é claro) se chama Próxima Centauri e está a 4,24 anos-luz de distância. Se nos afastarmos à distância de 12,5 anos-luz do Sol, notaremos que existem ao todo 33 estrelas com distâncias dentro desse raio (Figura 1.2). A maior parte delas é constituída por anãs vermelhas intrinsecamente pouco luminosas, como a própria Próxima Centauri (isso não é uma coincidência: a maioria das estrelas de toda a Via Láctea é de fato menos massiva e menos luminosa que o Sol). Como consequência, apenas cinco entre elas (Alfa Centauri, Sirius, Procyon, Tau Ceti e Epsilon Eridani) são suficientemente luminosas para ser observadas a olho nu em nosso céu noturno (RECONS, 2012).

⁷ Em Astronomia, ao contrário do que se verifica na linguagem coloquial, as palavras “luminosidade” e “brilho” não são exatamente sinônimas. O termo “luminosidade” se refere sempre a uma propriedade *intrínseca* da estrela (a quantidade de energia emitida por unidade de tempo), e é assim que ele será usado neste trabalho.

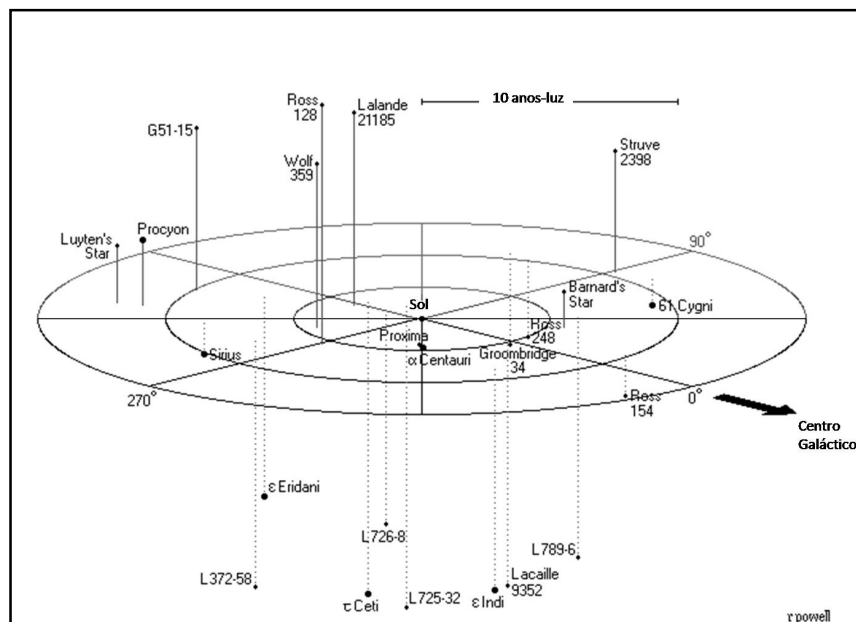


Figura 1.2 – Estrelas na vizinhança solar (até 12,5 anos-luz do Sol). (Crédito: POWELL, 2006.)

Se nos afastarmos por um fator de vinte vezes aquele mostrado na Figura 1.2, teremos uma perspectiva das vizinhanças solares até a distância de 250 anos-luz (Figura 1.3). Apesar de essa distância ser ínfima quando comparada ao diâmetro da Via Láctea (que é da ordem de 100.000 anos-luz), o número de estrelas situadas nessa região já está em torno de 260.000 (POWELL, 2006). Para permitir uma representação gráfica que seja compreensível, apenas as 1.500 mais luminosas dentre elas estão indicadas (por pequenos pontos) na Figura 1.3, e dentre essas somente poucas dezenas estão indicadas por seus nomes. Nesta nova escala, podemos constatar que, embora aquelas 1.500 estrelas mais luminosas correspondam a menos de 1% do total das estrelas existentes a essa distância, elas constituem cerca de um terço do total de estrelas que podemos observar a olho nu no céu noturno. Quase todas são mais massivas e luminosas que o Sol, e em sua maior parte possuem cor branca ou branco-azulada. Nesta escala, já temos uma amostra mais representativa da distribuição de estrelas na Via Láctea.

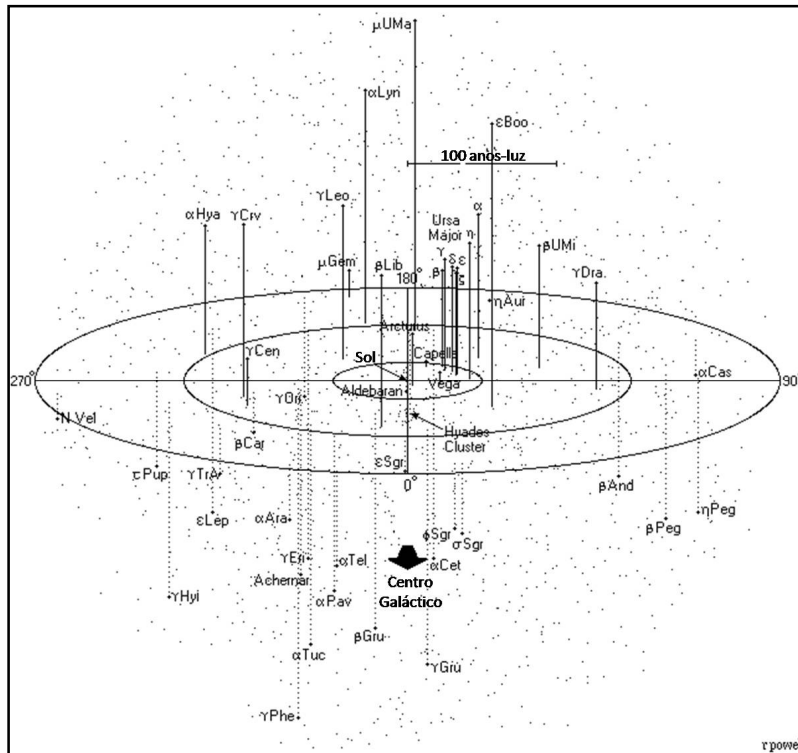


Figura 1.3 – Estrelas até 250 anos-luz de distância do Sol. Apenas as 1.500 estrelas mais luminosas (entre 260.000) estão representadas na figura por pontos. (Crédito: POWELL, 2006.)

Se pretendermos agora nos afastar por um fator de mais vinte vezes em relação à Figura 1.3 (ou seja, até uma distância de 5.000 anos-luz do Sol), a representação gráfica te tornará praticamente incompreensível (Figura 4). Isso porque, nessa escala, já estamos abrangendo uma porção significativa (cerca de 5% do diâmetro) da Via Láctea, e o número de estrelas nessa região está em torno de 600 milhões (POWELL, 2006). Já se pode visualizar, no entanto, a posição do Sol na Via Láctea – perdido entre as miríades de estrelas que formam o Braço de Orion, um dos braços espirais que são parte da estrutura de nossa Galáxia. Nessa escala, já se encontram praticamente todas as estrelas que podemos observar no céu noturno a olho nu. Além daquelas estrelas mais luminosas do que o Sol na proporção já citada na escala anterior, aqui temos também algumas supergigantes, tais como Betelgeuse (Alfa Orionis), situada a 640 anos-luz e com luminosidade equivalente a 100.000 vezes a solar (HARPER; BROWN; GUINAN, 2008).

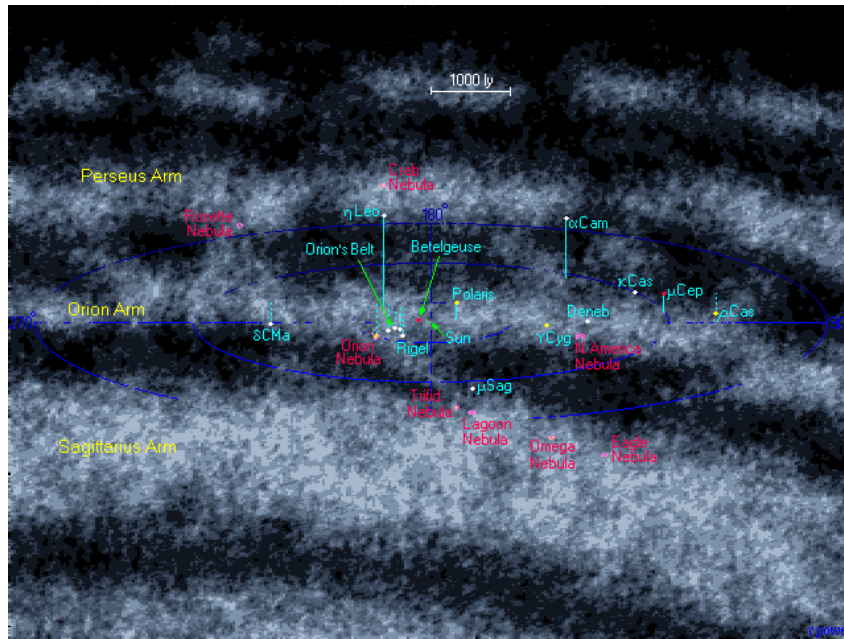


Figura 1.4 – Estrelas até 5.000 anos-luz de distância do Sol. (Crédito: POWELL, 2006.)

Finalmente, uma visão esquemática da Via Láctea como um todo é mostrada na Figura 1.5. Nessa figura, a posição central corresponde não mais ao Sol, mas ao centro da própria Galáxia. Notar a estrutura em forma de barra em torno de centro, cuja descoberta é relativamente recente (ver, por exemplo, LÓPEZ-CORREDOIRA et al., 2001). A posição do Sol, no Braço de Orion, a cerca de 26.400 anos-luz do centro galáctico, está indicada por uma seta. O número total de estrelas em nossa Galáxia é estimado em torno de 200 bilhões (KALER, 1997).

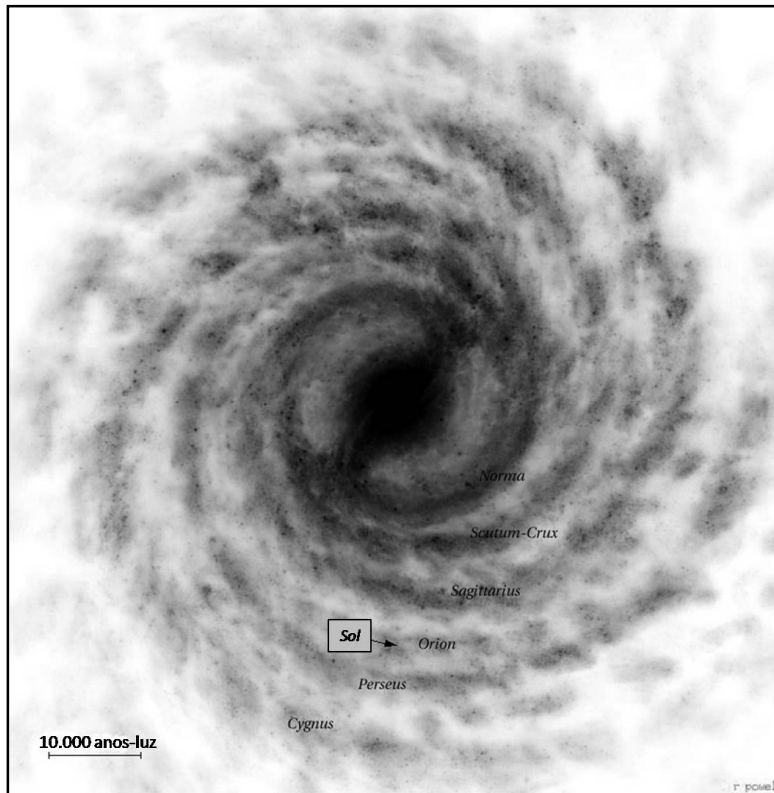


Figura 1.5 – Nossa Galáxia, a Via Láctea. Seu diâmetro é da ordem de 100.000 anos-luz e seu conteúdo estelar, da ordem de 200 bilhões de estrelas. (Crédito: POWELL, 2006.)

A título de curiosidade, se quiséssemos representar não mais o nosso Sol como uma esfera de 14 cm de diâmetro, mas sim *toda a Via Láctea* como um disco de 14 cm de diâmetro, a escala que teríamos de adotar não seria mais aquela de um para dez bilhões (ou 1:10.000.000.000) que usamos no modelo do Sistema Solar, mas sim a escala quase incompreensível de 1:100.000.000.000.000.000.000!

De tudo o que foi exposto neste item, podemos extrair ainda duas conclusões bastante interessantes e úteis para uma discussão em classe:

- A partir da definição de ano-luz e observando os exemplos da Tabela 1.2, fica evidente que a luz que nos chega de qualquer objeto celeste não corresponde ao instante em que o objeto está sendo observado por nós, mas sim ao momento em que a luz foi emitida por aquele objeto. Por exemplo, a Lua que observamos no céu é a Lua de um segundo atrás; o Sol que vemos é o Sol de oito minutos atrás; a Próxima Centauri que observamos nos dias atuais não é a estrela como ela é realmente hoje, mas como ela *era há pouco mais de quatro anos*; e assim por diante. Fica claro também que o céu noturno é uma espécie de “colcha de retalhos” no tempo. Nele visualizamos as estrelas como elas eram há anos – ou há centenas de anos, ou há milhares de anos – no passado,

dependendo da distância de cada uma. É possível que algumas delas nem existam mais – porém ainda poderemos contemplá-las por algum tempo.

- As distâncias entre as estrelas são inacreditavelmente grandes em proporção às suas dimensões. Tomemos o exemplo típico do Sol, cujo diâmetro é de cerca de 1.400.000 km, e comparemos essa medida à sua distância à estrela mais próxima (Proxima Centauri), que, como vimos, é da ordem de 40.200.000.000.000 km. A proporção entre essa distância e o diâmetro solar é da ordem de *vinte e oito milhões para um*. Essa proporção é típica quando se trata das distâncias entre as estrelas da Via Láctea (mas é muito diferente, por exemplo, da relação entre as distâncias intergalácticas e as dimensões de cada galáxia). Na verdade, essa proporção de dezenas de milhões para um é inédita na Natureza. Ela equivaleria, por exemplo, a uma praia na qual os grãos de areia (da ordem de meio milímetro cada) estivessem separados entre si... por uma distância de dez quilômetros ou mais!

1.6 Notação científica: potências de base 10

Nos itens anteriores, já percebemos que em Astronomia os grandes números são muito comuns e até um pouco difíceis de visualizar. Porém, felizmente, existe uma maneira bem mais conveniente de trabalhar com esses imensos números encontrados na ciência astronômica. Da matemática podemos lembrar o conceito de potenciação e, particularmente, das potências de base dez. Da definição da operação de potenciação, sabemos, por exemplo, que:

$$10^3 = 10 \times 10 \times 10 = 1.000$$

$$10^2 = 10 \times 10 = 100$$

$$10^1 = 10$$

$$10^0 = 1$$

$$10^{-1} = 1 / 10 = 0,1$$

$$10^{-2} = 1 / 100 = 0,01$$

... e assim por diante. Lembramos ainda que podemos representar mesmo os números que não sejam potências de dez exatas de forma análoga, como se vê nos exemplos a seguir:

$$5000 = 5 \times 1000 = 5 \times 10^3$$

$$0,03 = 3 / 100 = 3 / 10^2 = 3 \times 10^{-2}$$

Esse tipo de notação – que é conhecido como *notação científica* – é geralmente utilizado com grande frequência não só na Astronomia, como também em outras ciências que trabalham usualmente com números extremamente grandes ou extremamente pequenos. Alguns exemplos são a Física de Partículas, a Engenharia, a Microbiologia, a

Estatística, a Microeletrônica e mesmo as Ciências de Computação (ou alguém não está familiarizado com as expressões “megabyte” ou “gigabyte”?).

Podemos entender melhor o uso da notação científica observando a Tabela 1.3 abaixo:

Designação	Número	Potência	Prefixo	Símbolo
Trilhão	1.000.000.000.000	10^{12}	tera	T
Bilhão	1.000.000.000	10^9	giga	G
Milhão	1.000.000	10^6	mega	M
Milhar	1.000	10^3	quilo	k
Centena	100	10^2	hecto	h
Dezena	10	10^1	deca	da
Unidade	1	10^0	.	.
Décimo	0,1	10^{-1}	deci	d
Centésimo	0,01	10^{-2}	centi	c
Milésimo	0,001	10^{-3}	mili	m
Milionésimo	0,000.001	10^{-6}	micro	μ
Bilionésimo	0,000.000.001	10^{-9}	nano	n
Trilionésimo	0,000.000.000.001	10^{-12}	pico	p

Tabela 1.3 – Potências de base dez e sua terminologia usual

1.7 A escala de dimensões do Universo

Finalmente agora, com o auxílio da notação científica, estamos em condições de visualizar as imensas dimensões espaciais do Universo, dentro daquilo que nosso senso comum pode avaliar. A Tabela 1.4, a seguir, demonstra as *ordens de grandeza* dos diversos objetos da Natureza, desde os imensamente pequenos (no reino da Física de Partículas) até os imensamente grandes (nos domínios da Astrofísica e Cosmologia), estes últimos também expressos em anos-luz. Note-se a enorme amplitude da faixa de

dimensões encontrada na Natureza, desde as partículas atômicas até o Universo como um todo: cerca de 10^{40} (ou seja, o número 1 seguido por quarenta zeros)!⁸

Escala nuclear	10^{-12} cm	-
Escala atômica	10^{-8} cm	-
Moléculas complexas	10^{-6} cm	-
Corpo humano	10^2 cm	1 m
Terra	10^7 m	0,03 segundos-luz
Sistema Solar	10^{13} m	8 horas-luz
Estrelas na vizinhança solar	10^{17} m	10 anos-luz
Braços espirais da Via Láctea	10^{19} m	1.000 anos-luz
A Galáxia (Via Láctea) vista por inteiro	10^{21} m	100.000 anos-luz
Aglomerado de galáxias (Grupo Local)	10^{23} m	10.000.000 de anos-luz
O Universo conhecido	10^{26} m	10.000.000.000 de anos-luz

Tabela 1.4 – Ordens de grandeza típicas de alguns objetos existentes na Natureza. A relação entre os maiores e menores objetos atinge 10^{40} ... e pode ser ainda maior.

1.8 A escala de tempos do Universo

Talvez a representação mais didática já concebida até hoje para a visualização da escala de tempos do Universo seja o “Calendário Cósmico”, idealizado pelo astrônomo norte-americano Carl Sagan (1934-1996) e publicado inicialmente em seu livro “*Os Dragões do Éden*” (SAGAN, 1980). Nele, Sagan comprime toda a história do Cosmos em um ano apenas, no qual o primeiro segundo do dia 1 de janeiro corresponde ao momento da criação do Universo (o Big Bang), e o último segundo do dia 31 de dezembro, aos dias atuais. Cada um dos eventos mais importantes na história do

⁸ É possível que essa faixa seja até maior. No mundo subatômico (território da física de partículas), as medidas ainda são muito incertas. Pesquisas recentes (2016) feitas em detectores de partículas parecem indicar que o limite superior ao raio dos quarks (elementos básicos que constituiriam os prótons e nêutrons) seria da ordem de 10^{-16} cm. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1604.01280>>. Acesso em 15 de março de 2017.

Universo e da espécie humana é representado por uma data do Calendário Cósmico, o que permite um entendimento imediato da escala de tempos do Universo. Para montar seu Calendário Cósmico, Sagan adotou a seguinte escala aproximada de tempos⁹:

- Um segundo do Calendário Cósmico corresponde a 475 anos reais
- Um minuto corresponde a pouco menos de 30 mil anos
- Uma hora corresponde a cerca de 1,7 milhões de anos
- Um dia corresponde a pouco mais de 41 milhões de anos
- Um mês corresponde a pouco mais de 1,23 bilhões de anos
- Um ano corresponde a 15 bilhões de anos

Abaixo, uma seleção de datas importantes que Sagan ressalta até dia 31 de dezembro:

Big Bang	1 de janeiro
Origem do Sistema Solar	9 de setembro
Formação da Terra	14 de setembro
Origem da vida na Terra (organismos procarióticos, como as cianobactérias)	~ 25 de setembro
Surgimento dos eucariontes (células com núcleos)	15 de novembro
Forma-se oxigênio em quantidade significativa na atmosfera terrestre.	1 de dezembro
Fim do período Pré-Cambriano e início do período Cambriano. Florescem os invertebrados.	17 de dezembro
Período Ordoviciano. Primeiros peixes e vertebrados.	19 de dezembro
Período Siluriano. Plantas começam a colonizar a terra firme.	20 de dezembro
Primeiros anfíbios. Primeiros insetos com asas.	22 de dezembro
Período Carbonífero. Primeiras árvores. Primeiros répteis.	23 de dezembro
Período Permiano. Aparecem os primeiros dinossauros.	24 de dezembro
Período Cretáceo. Primeiros mamíferos. Extinção dos dinossauros.	28 de dezembro
Período Quaternário. Aparecem os primeiros humanos.	31 de dezembro

⁹ Note-se que Sagan usou a melhor estimativa existente em 1980 para a idade do Universo (15 bilhões de anos). Nos dias de hoje, acredita-se que esse número esteja em torno de 13,8 bilhões de anos. Ainda que isso cause uma pequena alteração em relação às datas indicadas no calendário original de Sagan, essa mudança evidentemente não tira a essência e o mérito de sua concepção.

Como se vê, apenas no último dia do ano do Calendário Cósmico é que a espécie humana aparece. Porém, mesmo assim, os primeiros seres que podem ser classificados como da espécie *homo* (nossos ancestrais) não surgem no primeiro minuto do dia 31 de dezembro, mas apenas noventa minutos antes da meia-noite! Alguns acontecimentos significativos do último dia do Calendário Cósmico são vistos a seguir:

Primeiros hominídeos: <i>Homo habilis</i> , <i>Homo rudolfensis</i> , <i>Homo ergaster</i>	22:30
Uso generalizado de ferramentas de pedra	23:00
Domínio do fogo pelo Homem de Pequim (<i>Homo erectus</i>)	23:46
Pinturas em cavernas na Europa	23:59
Invenção da agricultura	23:59:20
Civilização neolítica. Primeiras cidades.	23:59:35
Primeiras dinastias na Suméria e Egito. Desenvolve-se a Astronomia.	23:59:50
Geometria Euclidiana. Física de Arquimedes. Astronomia ptolemaica. Império Romano. Nascimento de Cristo.	23:59:56
Civilização maia. Dinastia Sung na China. Império Bizantino. Invasão dos mongóis. As Cruzadas.	23:59:58
Renascença na Europa. Viagens de descobrimento partem da Europa. Dinastia Ming na China. Aparece o método científico experimental.	23:59:59
Desenvolvimento da ciência e da tecnologia, em especial telecomunicações e internet. Desenvolve-se a Astrofísica. Início da exploração espacial.	24:00 (agora)

Tabela 1.5 (dividida acima em duas partes) – Uma seleção de eventos importantes relacionados por Carl Sagan no seu Calendário Cósmico e suas respectivas datas naquela representação

1.9 Atividades sugeridas (para professores)

De início, recomendaríamos os exercícios abaixo para fixação dos conceitos vistos nos itens 1.2 a 1.5. Os dados, datas e valores neles mencionados são reais.

- Em 1960, a estrela Epsilon Eridani foi a primeira em que se buscou detectar, com radiotelescópios, eventuais sinais emitidos por civilizações extraterrestres. Ela se encontra à distância aproximada de 100.000.000.000.000 km da Terra. Qual sua distância em anos-luz? E em UA?

- Peça aos alunos para montarem a tabela de distâncias dos planetas ao Sol (Tabela 1.1) em unidades astronômicas e em unidades-luz.
- No dia 27 de agosto de 2003, o planeta Marte atingiu a sua maior aproximação da Terra nos últimos sessenta mil anos. Sua distância ao nosso planeta nessa data era de 55,8 milhões de km. Calcule essa distância em UA.
- A estrela Sirius se encontra a 8,6 anos-luz da Terra. Uma sonda espacial deixa a Terra em sua direção, à velocidade constante de 12 km/s. Quanto tempo a sonda levará para chegar a Sirius?
- Quantas unidades astronômicas existem em um ano-luz?
- No dia 23 de julho de 1995, os astrônomos amadores norte-americanos Alan Hale e Thomas Bopp descobriram um novo cometa, que passou a ser chamado de Hale-Bopp em sua homenagem. Sua distância heliocêntrica (distância ao Sol) era de 7,15 UA na noite da descoberta. Você diria que ele se encontrava então entre as órbitas de quais planetas?

São dados para os exercícios: velocidade da luz no vácuo = 300.000 km/s; 1 UA (unidade astronômica) = 150 milhões de km. Para as distâncias no Sistema Solar, consultar Tabela 1.1.

A seguir, encontra-se uma série de questões para discussão em classe. Algumas delas poderão ser acompanhadas por projeções de vídeos e animações disponíveis na internet. Links para os mesmos estão indicadas no texto de cada sugestão.

- O célebre filósofo francês Auguste Comte (1798-1857), um dos idealizadores do positivismo, escreveu, no ano de 1835, em sua obra *Cours de Philosophie Positive (19ème leçon)*, referindo-se aos corpos celestes: “Podemos conceber a possibilidade de determinar suas formas, suas distâncias, suas grandezas e seus movimentos; no entanto, não saberemos jamais estudar, por quaisquer meios, sua composição química...”
Discutir em classe essa afirmação de Comte, à luz do desenvolvimento da espectroscopia, conforme visto no item 1.2. A que conclusões podemos chegar nos dias de hoje?
- Na página web <https://en.wikipedia.org/wiki/Scale_model> pode ser vista uma descrição das diversas escalas usadas para construir maquetes de objetos terrestres, tais como prédios, automóveis, navios, aeronaves etc. Peça aos alunos que calculem as dimensões de uma maquete do Sistema Solar na escala usada para representar a cidade de Singapura (1:50.000), e depois discutam os resultados. Parece viável construir essa maquete? Por quê?
- Uma das representações visuais mais famosas da escala de dimensões do Universo foi o pequeno filme *Powers of ten*, criado em 1977 por Charles e Ray Eames, nos USA. Desde então, numerosas outras representações têm sido

criadas – várias delas incorporando os avanços da ciência desde aquela época. Algumas dessas estão disponíveis na internet. De início, recomendamos assistir aos vídeos abaixo:

- Vídeo original *Powers of ten* (1977, em inglês). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=0fKBhvDjuy0>>.
- O mesmo vídeo, com legendas em português. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=L5L7K0pbU4I>>.
- Adaptação resumida do filme IMAX *Cosmic voyage* (1997), em inglês. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=bhofN1xX6u0>>.
- *The scale of the Universe*, animação de Cary e Michael Huang, legendada, 2012. Disponível em: <<http://htwins.net/scale2/lang.html>>.

Selecione dois ou três desses filmes para discussão em classe. Compare o vídeo original dos Eames com os mais atualizados e resalte as diferenças entre eles.

- Projete em sala o seguinte vídeo (uma atualização do Calendário Cósmico original de Carl Sagan, apresentada por Neil deGrasse Tyson em 2014), que está disponível em: <<http://video.nationalgeographic.com/tv/cosmos-a-spacetime-odyssey/the-cosmic-calendar?source=relatedvideo>>.

A seguir, conduza uma discussão em classe com o seguinte tema: “*Como será o primeiro minuto do próximo Ano Cósmico?*” Alguns pontos que poderiam ser explorados são:

A espécie humana evoluiu rapidamente e conquistou a tecnologia para dominar a energia nuclear, para comunicar-se instantaneamente e para se aventurar no Sistema Solar. Mas adquiriu também a capacidade de se autodestruir, de devastar os recursos naturais e de romper o delicado tecido ecológico que permite sua própria existência em nosso planeta.

Se nossos descendentes terão um futuro e um planeta habitável para viver ou se, ao contrário, o primeiro minuto do Novo Ano Cósmico não mais incluirá a espécie humana, isso dependerá de escolhermos entre a sabedoria ou a estupidez no momento presente – tanto na preservação do meio ambiente, como no respeito à nossa própria espécie, incluídos aqui todos os seus diferentes indivíduos, sociedades e culturas.

Em ambos os casos, somos o produto de bilhões de anos de evolução. Podemos desperdiçá-los por completo ou não – e esta é talvez a primeira vez que podemos fazer essa escolha. O futuro da espécie humana pode ser brilhante ou catastrófico. Isso depende unicamente de nós.

Referências bibliográficas para o Capítulo 1

BECKER, B. *Eclecticism, opportunism, and the evolution of a new research agenda: William and Margaret Huggins and the origins of Astrophysics*. PhD thesis (History of Science). Maryland, USA: The Johns Hopkins University, 1993. Disponível em: <<http://faculty.humanities.uci.edu/bjbecker/huggins/index.html>>. Acesso em: 15 de março de 2017.

CLERKE, A. *A popular history of Astronomy during the nineteenth century*. London: Adam and Charles Black, 3rd edition, p. 167-70, 1893.

HARPER, G.M.; BROWN, A.; GUINAN, E. A new VLA-Hipparcos distance to Betelgeuse and its implications. *The Astronomical Journal*, v. 135, issue 4, p. 1430-40, 2008. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2008AJ....135.1430H>>. Acesso em: 16 de março de 2017.

HOFFLEIT, D. History of the discovery of Mira stars, *Journal of the American Association of Variable Stars Observers*, v. 25, p. 115-36, 1997. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1997JAVSO..25..115H>>. Acesso em: 17 de março de 2017.

HOLDEN, E.S. Researches on the relative brightness of stars: variable stars. In: *Sir William Herschel: his life and works*. New York: Charles Scribner's Sons, p. 130-4, 1881.

HORVATH, J.E. Uma proposta para o ensino da Astronomia e Astrofísica Estelares no Ensino Médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 35, n. 4, 4501, 2013.

HOSKIN, M. *Discoverers of the Universe: William and Caroline Herschel*. Princeton: Princeton University Press, p. 20-3, 2011.

KALER, J. *Stars and their spectra*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 14, 1997.

LÓPEZ-CORREDOIRA, M. et al. Searching for the in-plane galactic bar and ring in DENIS. *Astronomy and Astrophysics*, v. 373, p. 139-52, 2001. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2001A%26A...373..139L>>. Acesso em: 17 de março de 2017.

MacEVOY, B. The William Herschel double star catalogs restored, 2011. Disponível em: <<http://www.handprint.com/ASTRO/herschel.html>>. Acesso em: 13 de março de 2017.

MOURA, B.A. Newton versus Huygens: como (não) ocorreu a disputa entre suas teorias para a luz. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 33, n. 1, p. 111-41, 2016.

NEWTON, I. *Opticks* (1704). Tradução: André K.T. Assis, p. 39-82. São Paulo: Edusp, 1996.

PANNEKOEK, A.: *A history of Astronomy*. New York: Dover Publications, 1989.

PICKERING, E.C. Sir William Herschel's observations of variable stars. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, v. 19, p. 269-78, 1884.

POWELL, R. An atlas of the Universe. 2006. Disponível em: <<http://www.atlasoftheuniverse.com/index.html>>. Acesso em: 27 de março de 2017.

RECONS (Research Consortium on Nearby Stars). The one hundred nearest star systems. 2012. Disponível em: <<http://www.astro.gsu.edu/RECONS/TOP100.posted.htm>>. Acesso em: 27 de março de 2017.

SAGAN, C. *Os dragões do Éden: especulações sobre o desenvolvimento da inteligência humana*, p. 1-5. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1980.

STEINICKE, W. *Discovery and cataloguing of nebulae and star clusters*. 2016. Disponível em: <http://www.klima-luft.de/steinicke/index_e.htm>. Acesso em: 14 de março de 2017.

%%%%%%%%%