

2 — O Diagrama mais Importante para o Astrofísico

O capítulo anterior deu-nos uma idéia da diversidade das estrelas. Há astros ricos em massa que são claros, azuis, bem como outros, pobres em massa, que são vermelhos. Há grandes estrelas vermelhas, gigantes vermelhas e supergigantes, bem como pequenas estrelas brancas, as anãs brancas. E nós, mortais, desempenhamos o papel da efemérida, ao tentarmos impor uma seqüência cronológica nesta enorme variedade.

Hoje em dia, o problema já foi equacionado e a lei regendo a evolução estelar foi detectada, pelo menos em seus traços principais. Vamos ver de que maneira isto aconteceu.

Primeiro, é preciso estabelecer uma certa ordem na multiplicidade das estrelas. Portanto, vamos coordenar todas as observações de estrelas acessíveis, segundo critérios mensuráveis.

Medição e Coordenação das Estrelas

Para este mister, a *temperatura de superfície* das estrelas surge como fator primordial, de fácil aplicação. Pode ser determinada com relativa facilidade, pois se revela pelas cores. Na maioria das vezes, o observador do céu estrelado nem se dá conta de que as estrelas são de cores diferentes. É possível determinar a cor das estrelas, comparando fotos do firmamento noturno, feitas com diversos filtros de cor. As estrelas azuis são quentes, ao passo que as vermelhas são relativamente frias. Todavia, a cor dá apenas uma sugestão vaga da temperatura; o exame do espectro das estrelas fornece dados mais precisos. Em princípio, é possível determinar, diretamente, a temperatura da superfície brilhante, de todas as estrelas no céu, que lá surgem com luminosidade suficiente para tal determinação. Isto acontece com *Sirius A*, a estrela principal do sistema de *Sirius*, que, com uma temperatura de superfície de uns 9.500°C , está entre as estrelas mais quentes. Na região da nebulosa de Órion há estrelas, cuja temperatura de superfície atinge até 20.000°C . *Betelgeuse*, a estrela mais clara na constelação de Órion, aparece

vermelha, mesmo a olho nu; por conseguinte, é uma estrela fria e a temperatura da sua superfície é de 3.000°C . Lembremos, a título de comparação, que a temperatura da superfície do Sol é de 5.800°C .

Outro fator importante é a *intensidade do brilho* da estrela; ou seja, a energia por ela irradiada p/segundo, para o universo. Este fator não pode ser determinado, imediatamente, pela observação do astro. A intensidade do brilho com a qual a estrela surge no céu pode ser medida; porém, tal medição nada revela da quantidade de energia irradiada no espaço. Estrelas de brilho idêntico podem parecer claras, no firmamento, quando posicionadas a diversas distâncias de nós, visto que, segundo a lei da difusão da luz, a estrela mais distante parece-nos como de brilho mais fraco do que aquela, de brilho igual, mas situada mais perto de nós. Somente depois de conhecer a distância de uma estrela da Terra é possível calcular a quantidade de energia irradiada no espaço. Para se ter uma idéia geral de como o astrônomo determina a distância de uma estrela, vide Anexo B. Por conseguinte, conhece-se a intensidade do brilho das estrelas, após ter sido medida a sua distância da Terra. Apesar de o Sol surgir no céu como a estrela fixa mais clara, em comparação com outros astros, a intensidade do seu brilho é bem moderada; as estrelas de brilho mais intenso brilham 100.000 vezes mais do que o Sol e o fato de, mesmo assim, elas parecerem no firmamento como minúsculos pontinhos luminosos, prende-se à sua distância imensa do planeta Terra. Além disso, há também estrelas bastante inexpressivas, cujo brilho atinge tão-somente 1 centésimo de 1 milésimo daquele do Sol.

Acabamos de mencionar duas propriedades importantes, mensuráveis, das estrelas, a saber: sua temperatura de superfície e a intensidade do seu brilho. Com isto surge a pergunta se, no universo, existiriam todas as combinações possíveis e imagináveis desses dois fatores. Logo, é lícito perguntar: haveria estrelas de brilho intenso, que são quentes e, outras, de brilho igualmente intenso, que são frias? Haveria pouco brilho, tanto nas estrelas quentes quanto nas frias?

O Diagrama de Hertzsprung e Russell

Os astrônomos costumam debater esses problemas baseando-se num diagrama, no qual marcam a temperatura da superfície e a intensidade do brilho da estrela em questão. Este diagrama prestou-nos ajuda valiosíssima, quase fantástica, na decifração

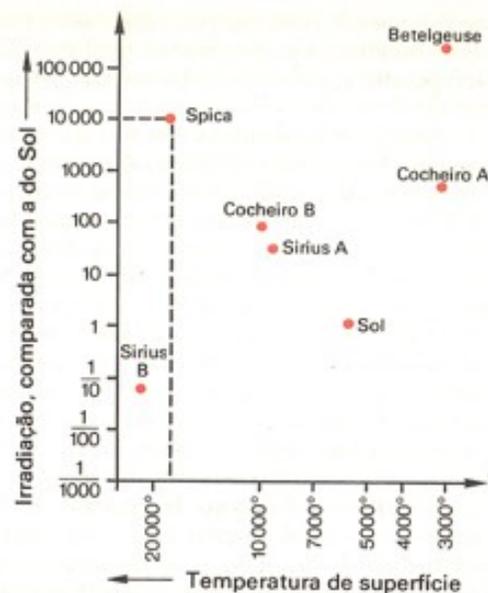


Fig. 2-1. Diagrama Hertzsprung-Russell com algumas estrelas já conhecidas de nós. Tão logo se conheça a temperatura de superfície de uma estrela, pode-se prosseguir para cima, a partir da temperatura correspondente, na escala horizontal. No caso de conhecer-se também a intensidade de seu brilho, prossegue-se para a direita, a partir do respectivo valor de irradiação, na escala vertical. A estrela deve ser marcada no ponto de interseção. A título de exemplo, duas linhas retas, tracejadas, elucidam o caso de *Spica* (temperatura de superfície 18.000°C , intensidade de brilho 10.000 vezes a intensidade do Sol) e mostram como uma estrela deve ser marcada no diagrama.

da lei que rege a evolução estelar. Assim, trataremos deste diagrama. É denominado pelo nome de seus inventores, o dinamarquês Ejnar Hertzsprung e o norte-americano Henry Norris Russell; para facilitar as coisas vamos usar a sua abreviatura e chamá-lo de diagrama HR, adotando assim o seu termo técnico. Nele, a claridade de uma estrela é registrada no canto superior e a temperatura de superfície é marcada da direita para a esquerda (fig. 2-1). Ao calcular a temperatura de uma estrela com base em sua cor, obtemos um dos fatores importantes para o diagrama. No caso de também conhecermos a distância da estrela, da Terra, então a intensidade do seu brilho pode ser calculada em razão da luminosidade com que surge no firmamento. Assim temos os dois fatores necessários ao diagrama HR, no qual podemos marcar com um ponto a estrela em estu-

dos. A figura 2-1 mostra estes fatores, registrados para várias das estrelas que, entretanto, chegamos a conhecer. O fato de a escala de temperatura, indicada embaixo, não se apresentar uniforme, é devido a razões técnicas que não interessam neste nosso caso. As diversas intensidades de brilho são marcadas na margem esquerda. O algarismo 1.000 significa que, nesta altura, são registradas as estrelas de brilho mil vezes mais intenso que o do Sol. Portanto, o Sol situa-se bem no meio do diagrama, com intensidade de brilho 1 e temperatura de superfície de 5.800°C . As estrelas de brilho mais intenso que o do Sol ficam na parte superior do diagrama. As estrelas de brilho mais fraco, tais como a *Sirius B* e a anã branca do sistema de *Sirius* ficam na parte inferior. As estrelas mais quentes do que o Sol, tais como *Sirius A*, Zeta de Cocheiro B, a estrela quente no sistema de Zeta de Cocheiro, e *Spica* ficam ao lado esquerdo do ponto marcado para o Sol; as estrelas mais frias, tais como *Betelgeuse* e a supergigante no sistema Zeta de Cocheiro ficam à direita.

Os pontos marcados no diagrama HR já nos revelam algo das propriedades das estrelas. Como as estrelas frias emitem uma luz vermelha, as estrelas quentes, branca ou azul, à direita no diagrama estão marcadas as estrelas vermelhas e, à esquerda, as brancas ou azuis. Em cima estão registradas as estrelas de brilho intenso, embaixo, as de brilho fraco. Portanto, em cima, à direita, estão marcadas as estrelas frias, de intensa luminosidade. Acontece, porém, que 1 cm^2 da superfície de um corpo celeste frio irradia pouca energia por segundo. Como, apesar disso, sua irradiação é intensa, sua superfície deve abranger muitos centímetros quadrados; a estrela deve ser grande. Assim sendo, em cima, à direita, no diagrama HR, estão registradas estrelas grandes, as chamadas *gigantes vermelhas*, ou *supergigantes vermelhas*. Isto confirma nossas noções de um caso específico, a saber: a estrela principal no sistema Zeta de Cocheiro é de tamanho suficiente para abrigar a órbita terrestre. Da mesma forma, podemos passar agora para a parte inferior, à esquerda, do diagrama. Ali estão marcadas as estrelas quentes, de fraco brilho. Como 1 cm^2 da superfície de um corpo celeste quente irradia muita energia por segundo, mas as próprias estrelas têm pouca capacidade de irradiação, podemos concluir que elas devem ser pequenas. Embaixo, à esquerda, estão marcadas as anãs brancas; uma delas é *Sirius B*, satélite de *Sirius A*.

Por via de regra, o tamanho de uma estrela é calculado com base em seu brilho e em sua temperatura de superfície. A temperatura indica o índice da irradiação por cm^2 de superfície; a irradiação global, assinalada pela intensidade do brilho, revela

a extensão da área radiante; donde se deduz o raio da estrela.

Todavia, antes de usarmos o diagrama HR para responder à pergunta sobre a evolução cronológica dos astros, convém notar que a irradiação emitida por uma estrela dificilmente pode ser medida. A atmosfera terrestre não permite a passagem de todos os raios; por exemplo, a luz de ondas curtas e os raios ultravioleta não chegam até a Terra e mesmo os raios que atingem o fundo da atmosfera terrestre são muito difíceis de medir. O olho humano percebe apenas uma parte dos raios emitidos pelo Sol e pelas estrelas; tampouco um filme fotográfico absorve toda a irradiação. O olho humano e a emulsão fotográfica registram as diversas cores da luz com intensidade diferente. Destarte, os índices da luminosidade de uma estrela costumam restringir-se tão-somente aos raios perceptíveis ao olho humano. Os instrumentos para essas medições servem-se de filtros devidamente regulados, para se adaptarem à sensibilidade às cores do olho humano. Frequentemente, no diagrama HR registra-se tão-somente a *luminosidade perceptível* ao olho humano, em vez, da luminosidade efetiva da estrela, razão pela qual o termo técnico para este índice é *luminosidade visual*^o. Todavia, esta diferença é de pouca monta e por sua causa o diagrama HR fica apenas ligeiramente distorcido. Os diagramas publicados neste livro registram a luminosidade visual (irradiação perceptível); contudo, quando os dados a serem registrados nos diagramas são fornecidos pelo computador, sobre os quais falaremos ainda em outra parte, sempre marcamos luminosidade efetiva. Em todos os diagramas está claramente mencionada a espécie de luminosidade registrada.

As Estrelas Vizinhas do Sol

Nesta altura reunimos todas as condições necessárias para trabalhar com o diagrama HR. Começamos com as estrelas, posicionadas na vizinhança do Sol; como tais, entendemos estrelas "próximas" da Terra, cuja luz não leva mais de 70 anos para chegar até nós. Esta é, realmente, uma distância curta, considerando que a luz das estrelas mais longínquas, em nosso sistema de Via-Láctea, leva uns 70.000 anos para chegar até a Terra e

^o O fato de, com a diferenciação entre luminosidade efetiva e luminosidade visual, não se tratar apenas de diferenças sutis torna-se evidente, considerando que uma estrela de dez massas solares como, por exemplo, *Spica*, emite irradiação global dez mil vezes mais forte que a do Sol, quando, no âmbito da irradiação visual, sua luminosidade supera a do Sol somente mil vezes.

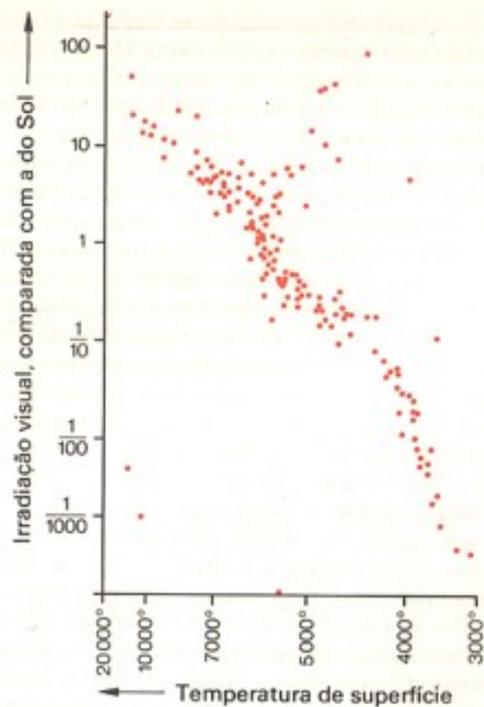


Fig. 2-2. Estrelas nas imediações do Sol, no diagrama HR. Em sua maioria, as estrelas possuem temperaturas de superfície e intensidade de brilho que as identificam por seus respectivos pontos no diagrama dentro de uma faixa, passando da esquerda, em cima, para a direita, embaixo. Esta faixa é chamada de *seqüência principal*. Algumas estrelas ficam à direita, em cima, são as gigantes vermelhas; outras à esquerda, embaixo, são as anãs brancas.

atingir os telescópios de espelho dos astrônomos terrestres. Das galáxias mais remotas, no universo, recebemos luz e ondas de rádio, emitidas há vários bilhões de anos, isto é, em época quando o cosmo ainda era novo. No entanto, as estrelas das quais tratamos ficam bem perto de nós, terrenos; mesmo assim, no espaço, elas ficam muito além do Sol. Do Sol, a luz leva somente 8 minutos para chegar até a Terra; a mais próxima estrela fixa, situada bem longe no hemisfério austral, é a *Proxima* de Centauro; a luz por ela emitida leva 4,5 anos para chegar até o planeta Terra.

As estrelas nas imediações do Sol são importantes pelo fato de podermos calcular a sua distância com razoável precisão



Fig. 2-5. Constelação das Pléiades (Sete-estrela). As estrelas mais claras provocam o brilho das massas de gás circundantes. Na foto, as nebulosas brilhantes encobrem a luz das estrelas que nelas se encontram. (Os quatro raios que, na foto, emanam das estrelas claras e o anel esférico são devidos a deficiências do sistema fotográfico e nada têm a ver com as estrelas). Além das estrelas claras, visíveis a olho nu, este aglomerado abrange mais de 100 outros componentes. Eles se movem através do espaço com velocidade igual; presumivelmente, nasceram ao mesmo tempo.

(© Instituto de Tecnologia da Califórnia e Instituição Carnegie de Washington; reprodução autorizada pelos Observatórios Hale).

(vide Anexo B), pois a claridade do brilho com que surgem no firmamento permite determinar a sua intensidade. Neste caso, fala-se em luminosidade visual, medida com um fotômetro, equipado com um filtro de cor, para irradiação visual. A temperatura de superfície é obtida com uma adicional medição da claridade, usando um filtro de cor, geralmente um filtro azul. A claridade da estrela na faixa de luz azul e a claridade no âmbito visual, que mais se aproxima da faixa de vermelho, permitem calcular a cor e, com isto, a temperatura de superfície da estrela. Para cada estrela, cuja temperatura de superfície e luminosidade visual foram calculadas dessa maneira, pode ser marcado um ponto no diagrama HR. A figura 2-2 mostra o resultado para as estrelas na vizinhança do Sol. Nota-se logo que a marcação dos pontos no diagrama não é uniforme. Os pontos correspondentes à maioria das estrelas situam-se ao longo de uma faixa que se estende de cima, à esquerda, onde

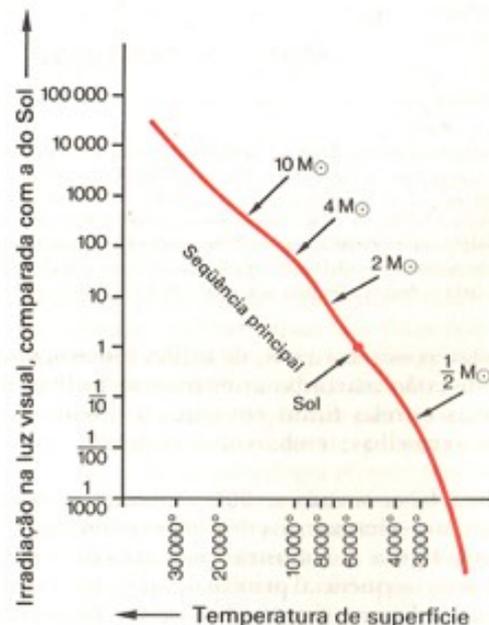


Fig. 2-3. O diagrama HR com a seqüência principal (marcada no desenho com uma linha vermelha). Em cada ponto da seqüência principal encontram-se, em dado momento, apenas estrelas de uma determinada massa. (O astrônomo usa freqüentemente a massa do Sol como unidade de medição e a ela deu o símbolo M_{\odot} .)

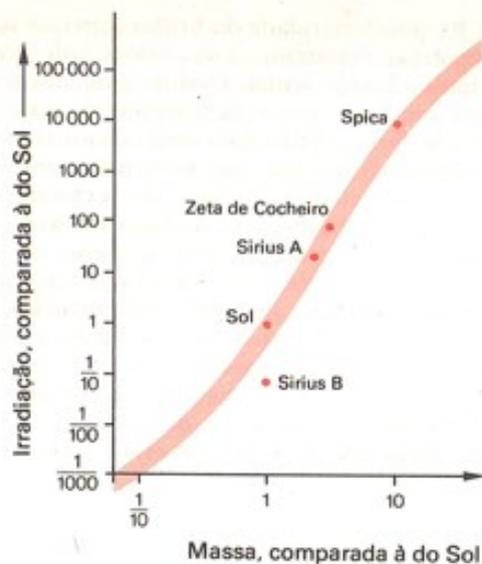


Fig. 2-4. Assinalando a intensidade de brilho na coluna à esquerda, de baixo para cima, e a massa estelar embaixo à direita, o diagrama mostra as estrelas da sequência principal numa faixa estreita: quanto maior a massa estelar, tanto mais intenso o brilho. É o *relacionamento massa/intensidade de brilho*. No entanto, isto só vale para as estrelas da sequência principal. A irradiação do satélite de *Sirius*, o *Sirius B*, é inferior à irradiação de uma estrela da sequência principal, de massa idêntica; ele não corresponde a tal relacionamento.

estão marcadas as estrelas azuis, de brilho intenso, para baixo, à direita, onde estão marcadas as estrelas vermelhas, de brilho fraco. Algumas estrelas ficam em cima, à direita, no âmbito das gigantes vermelhas; embaixo, à esquerda, estão 3 anãs brancas.

Nesta última faixa situam-se 90% de todas as estrelas; por isso, os astrônomos chamam-na de *sequência principal*. Uma comparação com a figura 2-1 mostra que também o Sol, *Sirius* e *Spica* estão nesta sequência principal, que, no entanto, não abrange a estrela fria no sistema Zeta de Cocheiro, nem *Betelgeuse*, tampouco o satélite de *Sirius*. As estrelas, cujos pontos marcados no diagrama HR se posicionam na sequência principal, são denominadas pelo astrofísico de *estrelas da sequência principal*. Nas proximidades do Sol, elas representam, por assim dizer, as estrelas normais, ao passo que as gigantes e as anãs fazem exceção à regra.

As estrelas da sequência principal revelam ainda uma outra propriedade importante relacionada com a sua massa. São poucas as estrelas das quais se sabe o quanto de matéria encerram, visto que a massa somente pode ser calculada com razoável precisão quando no campo de gravitação de uma estrela há movimento de satélites. Já falamos que, através de seus movimentos, os planetas nos permitem determinar a massa do Sol. O movimento do satélite de *Sirius* revela que *Sirius A* reúne umas 2,3 vezes a massa solar de matéria, ao passo que o seu satélite encerra aproximadamente 1 vez a massa solar de matéria. Seguindo este método, grande série de estrelas teve a sua massa calculada (o princípio está exposto no Anexo C). As estrelas mais ricas em massa contêm 30 a 50 vezes a matéria contida no Sol; as estrelas fixas, menos ricas em massa, atingem tão-somente alguns décimos da massa solar.

Com as estrelas da sequência principal, cuja massa pôde ser calculada com o auxílio dos seus satélites, obteve-se o seguinte resultado surpreendente: em cada trecho da sequência principal sempre há tão-somente estrelas de uma determinada massa (fig. 2-3). As estrelas da sequência principal de pouca massa ficam na parte inferior, as de muita massa, na parte superior. Acompanhando-se a sequência principal em toda a sua extensão, nota-se que, de baixo para cima, a massa aumenta paulatinamente. Como no diagrama HR a luminosidade também se intensifica de baixo para cima, é lícito estabelecer o seguinte: quanto mais intenso o brilho de uma estrela da sequência principal, tanto maior o volume da sua massa. Quando, de duas estrelas da sequência principal sabemos qual delas tem o brilho mais intenso, sabemos também qual das duas contém maior volume de massa. E ainda se pode ir mais longe: a massa pode ser deduzida diretamente da luminosidade, no caso de saber-se que se trata de uma estrela da sequência principal. A figura 2-4 mostra como a luminosidade aumenta proporcionalmente à massa dessas estrelas. Na terminologia técnica esta norma é definida como *relacionamento massa/intensidade de brilho*. Este relacionamento pode ser observado mormente com as estrelas da sequência principal, já conhecidas de nós, tais como o Sol, *Sirius A* e *Spica*; a anã branca *Sirius B* não segue esta regra, pois nem pertence à categoria das estrelas da sequência principal.

Com isto coordenamos as estrelas nas proximidades do Sol, acessíveis à nossa observação, e ainda detectamos duas normas, a saber: o diagrama HR revela a *sequência principal* e mostra que as *estrelas da sequência principal* estão sujeitas ao *relacionamento massa/intensidade de brilho*.

No entanto, o que tem a ver tudo isto com a lei que rege a

evolução estelar? Ai torna a surgir a imagem da efemérida. Nós, os terrestres, estamos vendo estrelas, de propriedades diversas, a maneira como a efemérida vê seres humanos, de atributos diferentes. Na seqüência principal encontramos uma ordem dessas características externas, mas não sabemos como interpretá-las. Até imitamos a efemérida que coordenou os seres humanos, segundo uma determinada característica, [quicá o tamanho de suas orelhas, e nem por isto chegou a saber algo da cronologia do desenvolvimento humano.

Aliás, nós, que conhecemos a evolução do homem, poderíamos dar um palpite à efemérida. Poderíamos chamar sua atenção ao fato de grupos escolares serem freqüentados por alunos da mesma faixa etária. Com base neste saber, a efemérida poderia determinar logo que o sexo e a cor da pele não são efeitos evolutivos e que pessoas de sexo diverso e de cor da pele diversa não representam as várias faixas etárias de um só indivíduo. Outrossim, a efemérida notaria como a estatura do corpo está intimamente relacionada com a idade da pessoa. O astrônomo fica em situação privilegiada quando detecta no céu a existência de "graus escolares", integrados por estrelas, pois isto significa que se trata de grupos estelares da mesma idade.

Aglomerados Estelares — "Graus Escolares" de Estrelas

Por vezes, as estrelas exibem uma espécie de instinto de manada, elas vão se ajuntando no céu, formando aglomerados. Alguns deles já eram conhecidos na Antiguidade, pois os poetas gregos e romanos já mencionam as Plêiades, constelação vulgarmente conhecida por Sete-estrela (fig. 2-5). A olho nu, distinguem-se as seis estrelas mais claras desta constelação de sete estrelas que, a rigor, abrange um número bem maior; neste aglomerado há muitas estrelas fracas, cujo número verificado é de 120, mas que, provavelmente, conta algumas centenas de estrelas. Todas as estrelas das Plêiades estão reunidas em um espaço relativamente pequeno. A luz leva 30 anos para chegar de uma borda da constelação à outra. Considerando que, no âmbito circular de 30 anos-luz de diâmetro ao redor do Sol, há apenas umas 20 estrelas, fica evidente que, no caso das Plêiades, se trata de um legítimo aglomerado estelar. Aliás, as Plêiades não se agrupam somente em um certo ponto do espaço, mas sim ainda voam com velocidade uniforme em uma mesma direção. A localização em comum e o movimento em comum permitem concluir que as estrelas das Plêiades teriam passado por uma evolução idêntica; que nasceram juntas.

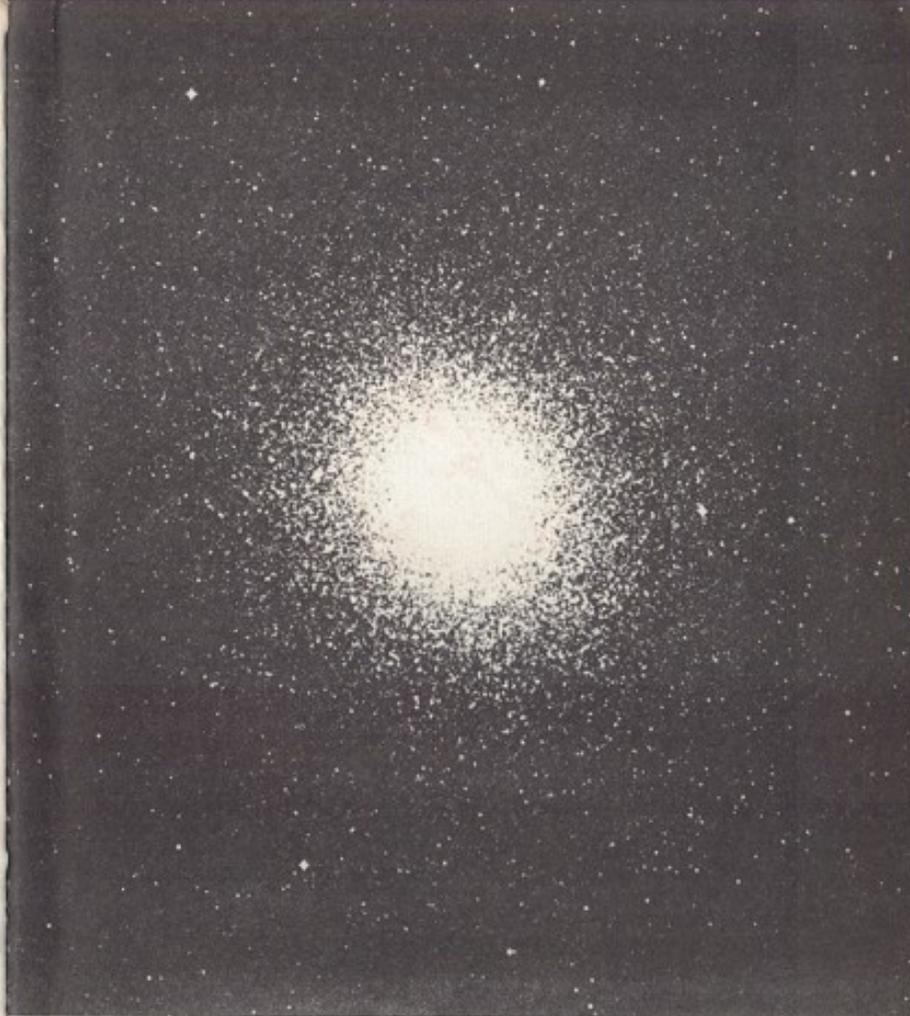


Fig. 2-6. Aglomerado estelar esférico 47 de Tucano, fotografado com o espelho Schmidt, de 1 m, do Observatório Europeu Sul, no Chile. Nele as estrelas se posicionam tão perto uma da outra que na região central nem aparecem estrelas avulsas. Destarte, a foto dá a impressão de as estrelas se tocarem, mutuamente, no centro, quando, na realidade, também lá estão muito afastadas umas das outras.

Isto vale também para outros aglomerados estelares, por exemplo, para as *Hiades*, também conhecidas desde a Antiguidade. Tal procedência em comum revela-se de maneira ainda mais nítida com os chamados *aglomerados estelares esféricos*, integrados por 50.000 a 50 milhões de estrelas (fig. 2-6). Nas regiões centrais destes aglomerados, as estrelas juntam-se em tal

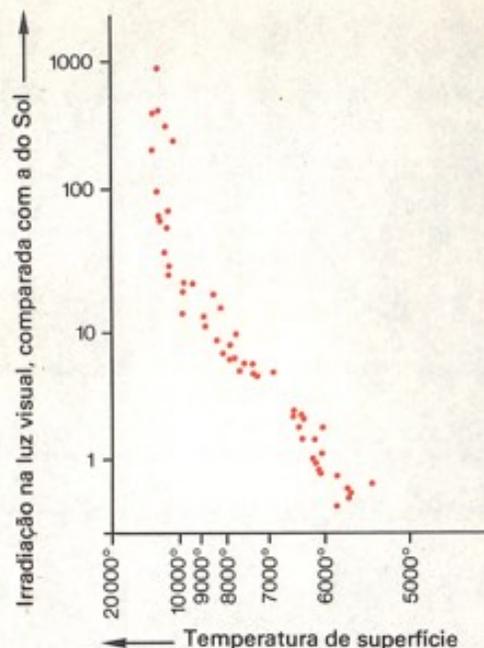


Fig. 2-7. O diagrama HR da constelação das Plêiades marca somente as estrelas mais claras que formam uma seqüência principal bem definida. No diagrama, em direção ascendente, as estrelas com intensidade de brilho na luz visual, até mais de 1.000 vezes a do Sol, desviam-se um pouco para a direita da seqüência principal.

densidade que, freqüentemente, atingem a 10.000 vezes a densidade dos aglomerados nas proximidades do Sol. Como deve ser deslumbrante a vista do céu estrelado para um observador, habitante de um sistema planetário, cujo Sol faz parte de um tal aglomerado estelar esférico!

Qual seria a distribuição das luminosidades e temperaturas de superfície para as estrelas integrantes de tais aglomerados? Quicã seguiria as normas adotadas pelas estrelas na vizinhança do Sol, conforme mostra a fig. 2-2? Será que também nesses aglomerados a maioria das estrelas seriam da seqüência principal? O exame dos respectivos diagramas HR revela uma diferença essencial. Existem, sim, aglomerados estelares, cujos integrantes efetivamente pertencem à seqüência principal, como a constelação das Plêiades (fig. 2-7). No entanto, na maioria dos aglomerados estelares, somente as estrelas de brilho mais fraco, isto é, as de menor luminosidade, apresentam atri-

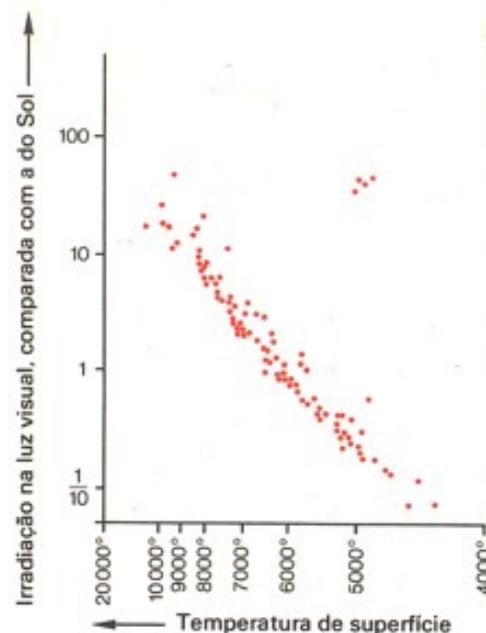


Fig. 2-8. Diagrama HR da constelação das Híades. Conquanto nas Plêiades (fig. 2-7) se encontrem estrelas da seqüência principal, cuja irradiação equivale a até 1.000 vezes a irradiação solar, a seqüência principal das Híades termina abaixo de 100 vezes a irradiação do Sol. Faltam as estrelas mais claras da seqüência principal; em compensação, no diagrama HR desta constelação há um grupo de gigantes vermelhas.

butos de estrelas da seqüência principal. Todavia, não se pode detectar a faixa completa da seqüência principal, pois ela está interrompida com a passagem de estrelas de brilho mais intenso. Faltam as estrelas da seqüência principal de brilho mais claro. Em compensação, o aglomerado abrange também estrelas vermelhas, claras, tais como as gigantes e supergigantes vermelhas, conforme mostra o diagrama HR das Híades (fig. 2-8). Aliás, a fig. 2-9 mostra um diagrama HR ainda mais nítido de um aglomerado estelar esférico. Ali, somente o trecho inferior da seqüência principal está ocupado, com os pontos marcando as estrelas mais brilhantes situados todos à direita. Este fenômeno pode ser verificado ainda melhor, marcando-se as estrelas de diversos aglomerados em um só diagrama HR, conforme mostra a fig. 2-10. Ali, a seqüência principal aparece como um traço fino, com as linhas grossas, tracejadas, indicando a posição das estrelas de diversos aglomerados. Nota-se como todos

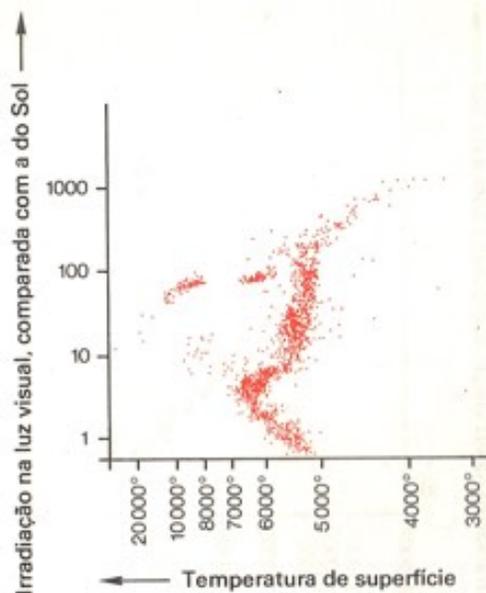


Fig. 2-9. Diagrama HR do aglomerado estelar M3; trata-se de um aglomerado estelar esférico, conforme mostra a fig. 2-6. Aqui, somente as estrelas, cuja irradiação equivale a 5 vezes a irradiação do Sol, que ainda se encontram na seqüência principal. Em sua maioria, as estrelas de brilho mais intenso não são estrelas da seqüência principal. Para trechos posteriores deste livro têm importância, entre outras, as estrelas cuja irradiação na luz visual é da ordem de 100 vezes a irradiação solar, posicionadas em uma faixa horizontal, que se estende de uns 5.800 até 13.000°C, e que é chamada de *ramo horizontal*.

os aglomerados estelares têm em comum um trecho da seqüência principal, mas "se desviam" para a direita e as estrelas de maior luminosidade já não se posicionam na seqüência principal, mas sim, à sua direita. Ademais, os pontos onde as linhas se desviam da seqüência principal são diferentes, de aglomerado em aglomerado. Como sabemos que, ao longo da seqüência principal, a massa aumenta em direção ascendente é lícito dizer que, abaixo de um certo volume de massa, as integrantes de um aglomerado são estrelas da seqüência principal e, no âmbito de massas maiores, a seqüência principal fica desocupada. Assim, este resultado de pesquisas forneceu a chave para a decifração do fator tempo na evolução estelar.

Em geral, no decorrer do tempo, com a estrela evoluindo, envelhecendo, suas propriedades mudam; em especial, há mudança na sua temperatura de superfície e na intensidade de

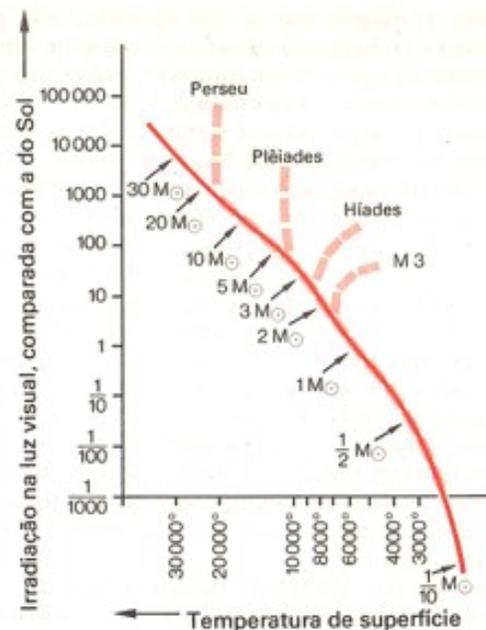


Fig. 2-10. Desvio de vários aglomerados estelares da seqüência principal (segundo Allen Sandage). As linhas vermelhas, tracejadas, indicam o local onde se situam as diversas constelações. Um aglomerado na constelação de Perseu mostra a seqüência principal mais evoluída, em direção ascendente, depois desvia-se para a direita. O aglomerado estelar esférico M3 tem a seqüência principal mais curta, pois seu desvio se dá bem embaixo, à direita. As setas à esquerda indicam onde se encontram estrelas da seqüência principal, de determinada massa, com os algarismos nas setas especificando a massa múltipla do Sol. Por conseguinte, o aglomerado na constelação de Perseu ainda abrange estrelas de seqüência principal com 10 a 15 vezes a massa solar, ao passo que as estrelas da seqüência principal mais ricas em massa, do aglomerado estelar esférico M3, possuem tão-somente 1,3 da massa solar.

seu brilho. Com o passar do tempo, o ponto marcado no diagrama HR para determinada estrela chega a deslocar-se. Se, por exemplo, a estrela fosse inicialmente uma gigante vermelha e, ao longo de milhões de anos, tivesse evoluído para uma anã branca, seu ponto no diagrama HR deslocar-se-ia de cima, à direita, para baixo, à esquerda. Se fôssemos seres longevos, macróbios e, durante milhões e bilhões de anos, pudéssemos medir as estrelas e marcar seus respectivos pontos no diagrama HR, verificaríamos o deslocamento desses pontos e como eles passam depressa por certas áreas e se demoram em outras. O diagrama HR nos permitiria acompanhar as *vias da evolução estelar*.

No entanto, a imagem que se nos apresenta não passa de um instantâneo e o diagrama mostra tão-somente onde as estrelas se encontram agora, neste instante*. Neste contexto salta à vista como as estrelas na vizinhança do Sol vão se agrupando na seqüência principal. O que significa tal fenômeno? Talvez os pontos no diagrama HR levassem muito tempo para passar pela faixa da seqüência principal e até então ficariam parados por algum tempo? Ao ser observado um aglomerado de estrelas de idades diferentes, quicá se notaria um número especialmente grande de estrelas posicionadas naquela faixa.

Conhecemos bem este efeito da nossa vida diária. Por que, no mundo, há mais adultos do que crianças? Porque somos criança por 15 anos apenas, ao passo que vivemos, em média, mais de 50 anos como adultos. Se examinarmos um grupo de pessoas de diversas faixas etárias — a gente que anda pelas ruas da nossa cidade — veremos que, em sua maioria, são adultos. Seguindo esta linha de pensamento, seria lícito especular que o estado evolutivo de seqüência principal fosse a "faixa etária" na qual a estrela continua por mais tempo, no decurso do seu desenvolvimento?

Lembremos que o próprio Sol é um astro da seqüência principal. Dele sabemos que, desde bilhões de anos, quase não mudou; logo, existem estrelas na seqüência principal, desde bilhões de anos. Sabemos que a energia contida no hidrogênio do Sol é suficiente para compensar a sua irradiação por esse espaço de tempo, tão prolongado. Ademais será que todas as estrelas da seqüência principal mantêm a sua irradiação com a fusão do hidrogênio? Continuariam elas inalteradas — por ser esta uma fonte energética altamente rentável — e seria esta a causa pela qual, no diagrama HR, as estrelas se agrupam na seqüência principal?

Suponhamos que todas as estrelas da seqüência principal compensam a energia por elas irradiada com a transformação do hidrogênio em hélio. Em outra parte, já calculamos para o Sol e para *Spica* por quanto tempo tal energia permite às estrelas brilharem. Supondo que 70% da massa estelar sejam de hidrogênio e que o esgotamento do combustível nuclear se faça notar com a transformação de somente 10% do hidrogênio, para o Sol, encontramos uma expectativa de vida da or-

* Ou melhor, em termos mais precisos: vimos onde estavam posicionadas, quando a luz por nós recebida hoje por elas foi emitida. Contudo, para a pesquisa da evolução estelar da nossa Via-Láctea, é muito breve o tempo que a luz leva em sua caminhada até a Terra, em comparação com os enormes espaços de tempo que as estrelas percorrem em sua evolução, de modo que tal diferença pouco importa.

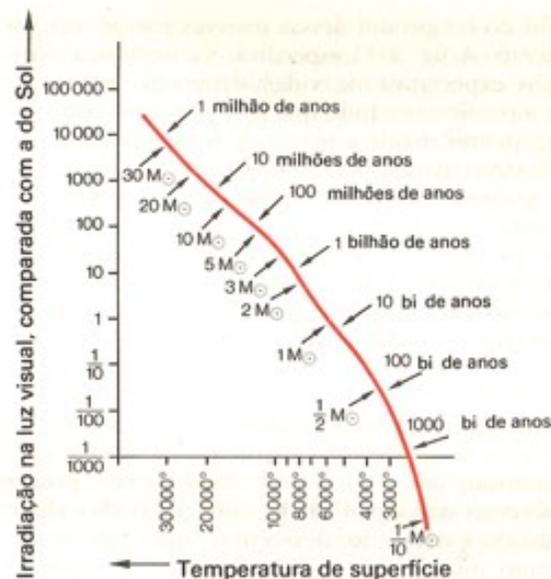


Fig. 2-11. Seqüência principal no diagrama HR. À esquerda, setas indicam a posição de estrelas da seqüência principal de determinada massa M_{\odot} . Como a massa determina as reservas de energia nuclear disponíveis e como se conhece a intensidade de brilho para cada ponto da seqüência principal, é possível calcular o período para o qual uma estrela, cujo ponto está marcado neste local, tem garantida a sua intensidade de brilho, por suas reservas de hidrogênio. Estes períodos são indicados pelas setas, à direita. Estrelas com mais de 30 vezes a massa solar dispõem de reservas de hidrogênio para um escasso milhão de anos. Por outra, estrelas com metade de massa solar têm combustível suficiente para quase 100 bilhões de anos. A comparação com a fig. 2-10 permite avaliar a idade do aglomerado estelar.

dem de sete bilhões de anos, ao passo que *Spica*, com dez vezes de massa solar e com umas dez mil vezes de luminosidade do Sol, poderia continuar com seu brilho atual por apenas mais alguns milhões de anos. Para tanto, tomemos qualquer estrela da seqüência principal, conforme mostra a fig. 2-3, pois, com base nesta fórmula, podemos calcular para cada estrela da seqüência principal, por quanto tempo a fusão de hidrogênio garantiria a sua luminosidade. O diagrama indica a intensidade de seu brilho; o relacionamento intensidade de brilho/massa, válido para as estrelas da seqüência principal, conforme fig. 2-4, permite-nos calcular a massa correspondente à respectiva intensidade de brilho. A comparação entre a energia nuclear, armazenada nessa massa, e a intensidade de brilho — ou seja, a energia irradiada p/segundo, no universo — indica

a duração do tempo útil dessas reservas energéticas, até o seu esgotamento. A fig. 2-11 especifica, na seqüência principal, a proporção expectativa de vida/hidrogênio, assim calculada. Isto vem a confirmar aquilo que já se presumiu com o exemplo de *Spica*: quanto maior a massa de uma estrela da seqüência principal, tanto mais acelerado o seu gasto de energia e por um período proporcionalmente menor duram as suas reservas de hidrogênio.

Quem, por toda a sua vida, tratou de estrelas, não pode deixar de notar como elas se parecem com os seres humanos e quanta coisa com eles têm em comum. Eis, quanto maior a massa, tanto mais reduzida a expectativa de vida!

A Idade dos Aglomerados Estelares

Se imaginarmos um grupo estelar da seqüência principal, de massas diversas mas igual idade, com todas elas alimentadas pela fusão do hidrogênio, deveremos supor que os efeitos de esgotamento surgiriam primeiro em cima, na seqüência principal, onde se posicionam as estrelas ricas em massa. No decorrer do tempo, estrelas de massa progressivamente menor teriam esgotadas as suas reservas energéticas. Ao término de 7 bilhões de anos, também as estrelas de massa igual à massa solar deveriam apresentar sinais de exaustão.

No entanto, não é justamente este o efeito que observamos nos aglomerados estelares? É só olhar o diagrama HR das Híades, conforme mostra a fig. 2-8. A seqüência principal deste aglomerado estelar está ocupada, em ordem ascendente, por astros irradiando até 20 vezes o brilho do Sol, no campo visual, o que corresponde a estrelas com 2,5 vezes de massa solar. A expectativa de vida/hidrogênio de uma estrela dessa massa é de 800 milhões de anos (fig. 2-11). Considerando que um grupo de estrelas de mesma idade vive da fusão do hidrogênio, por 800 milhões de anos, então, estrelas de massa maior do que 2,5 vezes a massa solar já teriam esgotado o seu hidrogênio, ao passo que estrelas de massa menor ainda disporiam de reservas suficientes para garantir a sua subsistência. Seria este o motivo pelo qual o trecho superior da seqüência principal das Híades está desocupado?

Outros aglomerados estelares abandonam a seqüência principal quando atingem uma intensidade de brilho diferente e, com isto, um outro volume de massa. Por exemplo, as Plêiades ainda abrangem estrelas da seqüência principal de 140 vezes o brilho do Sol; isto corresponde a estrelas de mais de 6 vezes a

massa solar e cuja expectativa de vida/hidrogênio é de somente 100 milhões de anos. No diagrama HR, as estrelas de claridade mais intensa da constelação das Plêiades não se posicionam exatamente na seqüência principal, mas sim, um pouco à direita, a seu lado; é este o primeiro sinal do efeito da exaustão. Destarte, *grosso modo*, é possível coordenar cronologicamente os aglomerados estelares; para tanto, basta o seu diagrama HR e verificar até onde, em direção ascendente, a seqüência principal está ocupada. A fig. 2-10 esquematiza, para vários aglomerados estelares, os pontos nos quais eles abandonam a seqüência principal. Um aglomerado na constelação de Perseu é o mais novo; ali, a seqüência principal tem até 1.000 luminosidades solares e sua idade é de 10 milhões de anos. Em seguida vêm as Plêiades, depois as Híades e, por fim, aparece o antigo aglomerado estelar esférico M-3. Neste último aglomerado, a seqüência principal está ocupada por estrelas de até três luminosidades solares; as estrelas da seqüência principal mais claras têm menos de 1,3 vezes a massa do Sol. Se, hoje em dia, estão em vias de abandonar a seqüência principal, então a sua idade deve ser de 6 a 10 bilhões de anos.

Seria idêntico o fato de a saída dos aglomerados estelares da seqüência principal, no diagrama HR, assinalar o esgotamento das reservas de hidrogênio? Em caso afirmativo, já teríamos compreendido uma boa parte da evolução estelar. Se assim for, uma estrela continuaria na seqüência principal até esgotar-se o seu hidrogênio e, depois, deslocar-se-ia para a direita, penetrando no âmbito das gigantes vermelhas, visto que as estrelas que abandonaram a seqüência principal ficam à direita. Se este raciocínio for correto, surgem novas perguntas, tais como: qual a idade dos aglomerados estelares mais antigos? e dos mais novos? O que eram as estrelas antes de haver a fusão do hidrogênio? O que acontece quando se esgotam as reservas de hidrogênio de uma estrela? Já sabemos que, então, as estrelas se tornam gigantes vermelhas, porém não podem continuar brilhando por muito tempo, porque a sua energia nuclear já se está esgotando.

Em todo o caso, cumpre lembrar: por enquanto estamos apenas especulando em torno da hipótese segundo a qual as propriedades das estrelas, integrando um aglomerado, estariam relacionadas com as reservas de energia nuclear. Este modo de pensar vem a calhar muito bem com as observações feitas, no entanto, os meios de que dispomos para as nossas pesquisas não nos permitem sequer averiguar se as temperaturas e densidades no interior da estrela seriam suficientes para produzir uma reação nuclear e fazer a estrela funcionar como

uma usina atômica. Em todo o caso, as temperaturas da superfície estelar não dariam para tanto. E como podemos chegar a conhecer as temperaturas no interior da estrela? A luz proveniente das estrelas emana de uma delgada camada de superfície. Conforme acontece com o Sol, a luz provém de uma "atmosfera", cuja massa equivale a somente 1 centésimo de 1 bilionésimo da massa total do Sol. Até agora, ainda não conseguimos penetrar mais no fundo. Mas, mesmo assim, conhecemos melhor o interior do Sol do que o da Terra. Como foi que isto se deu será exposto no capítulo seguinte.