**2- O Diagrama mais Importante**

**para o Astrofisico**

O capitulo 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 anás brancas. E nós, mortais, desempenhamos o papel da cfemérida, ao tentarmos impor uma sequência 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 tracos principais. Vamos ver de que mancira 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 superficie 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 šo 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 principio, é possivel determinar, diretamente, a temperatura da superficie 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 superficie de uns 9.500°C, está entre as estrelas mais quentes. Na região da nebulosa de Orion ha estrelas, cuja temperatura de superficie atinge até 20.000°C. Betelgeuse, a estrela mais clara na constelação de Órion, aparece

Betelgeuse

100000

10000---- Spica

Cocheiro A

Cochelro B

Sirius A

Irradiação, comparada com a do Sol -

• Sol

Sirius!

vermelha, mesmo a olho nu; por conseguinte, é uma estrela fria e a temperatura da sua superficie é de 3.000°C. Lembremos, a titulo de comparação, que a temperatura da superficie 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 medico nada revela da quantidade de energia irradiada no espaço. Estrelas de brilho idêntico podem parecer caras, no firmamento, quando posicionadas a diversas distancias 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 distància de uma estrela da Terra é possível calcular a quantidade de energia irradiada no espaço. Para se ter uma idéia geral de como o astronomo determina a distància 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 distància imensa do planeta Terra. Além disso, há também estrelas bastante inexpressivas, cujo brilho atinge tãosomente 1 centésimo de 1 milésimo daquele do Sol.

Acabamos de mencionar duas propriedades importantes, mensuráveis, das estrelas, a saber: sua temperatura de superficie 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 licito 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?

F.00002

- 00001

**Tし**

Temperatura de superficie

Fig. 2-1. Diagrama Herzsprung-Russell com algumas estrelas jij conhecidas de nós. Tho logo se conhec a temperatura de superficie de uma estrela, podeve prosseguir para cima, a partir da temperatura correspondente, na escala horizontal. No caso de conhecer-se também a intensidade de seu brilho, prosecguc-se para a direita, a partir do repctivo valor de imadiação, na escala vertiGal. A estrela deve ser marcada no ponto de interseclo. A tulo de exemplo. duas linhas retas, tracejadas, elucidam o caso de Sprca temperatura de superficie 18.000°C, intensidade de brilho 10.000 vezes a intensidade do Solle mostraff como uma estrela deve ser marada no diagramma.

da lei que rege a evolução estclar. Assim, trataremos deste diagrama. E denominado pelo nome de seus inventores, o dinamarquès Ejnar Hertzsprung eo norte-americano Henry Noris 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 superficie 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

**O Diagrama de Hertzsprunge Russell**

Os astrónomos costumam debater esses problemas baseandose num diagrama, no qual marcam a temperatura da superficie e a intensidade do brilho da estrela em questão. Este diagrama prestou-nos ajuda valiosissima, quase fantástica, na decifração 28

29

dos. A figura 2-1 mostra estes fatores, registrados para varias das estrelas que, entrementes, 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 margern esquerda. O algarisino 1.000 significa que, nesta almura, 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 I e temperatura de superficie 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 Bcaanā branca do sistema de Sirius ficam na parte inferior. As estrelas mais quentes do que o Sol, tais como Sirius 4, 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 Belegeuse 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 estrela 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 da superficie de um

corpo celeste frio irradia pouca energia por segundo. Como, apesar disso, sua irradiação é intensa, sua superficie deve abranger muitos centimetros 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 especifico, 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" da superficie 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 anās 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 superficie. A temperatura indica o indice da irradiação por cm'de superficie; a irradiação global, assinalada pela intensidade do brilho, revela 30

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

Todavia, antes de usarmos o diagrama HR para responder å 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 dificeis 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 indices 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. Freqüentemente, no diagrama HR registra-se tão-somente a luminosidade percebrível ao olho humano, em vez, da luminosidade efetiva da estrela, razão pela qual o termo técnico para este indice é luminosidade visual". 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 (itadiação perceptível); contudo, quando os dados a serem registrados nos diagramas são fornecidos pelo computador, sobre os quais falaremos ainda ein 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. Comecemos 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 longinquas, em nosso sistema de Via-Láctea, leva uns 70.000 anos para chegar até a Terra e

O fato de, com a diferenciacio entre luminosidade eletiva e luminosidade visual, não se tratar apenas de diferenças suis toma-se evidente, considerando que uma estrela de der massas solares como, por exemplo, Spica, emite irra diaco global dez mil vezes mais fonte que a do Sol, quando, no ámbito da irra diação visual, sua luminosidade supera a do Sol somente mil vezes.

31

. Irradiação visual, comparada com a do Sol

-

l-

8-

+200002

10000

7000 -

5000®

4000

3000 -

Temperatura de superficie

Fig. 2-2. Eyelas nas imediados do Sol, no diagrama HR. Em sua maioria, als estrelas posuem temperaturas de superficie e intensidade de brilho que as identificam por seus respectivos pontos no diagrama dentro de uma Gixi, passando da esquerda, em cima, para a direita, embaixo. Esta Gixa é chamada de südania prial. Algumas estrelas ficam à direita, em cima, são as gigante vermelhas outras a esquerda, embaixo, são as anis brancas.

atingir os telescópios de espelho dos astrónomos 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 distància com razoável precisão

32

(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 superficie 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 ámbito visual, que mais se aproxima da faixa de vermelho, permitem calcular a cor e, com isto, a temperatura de superficie da estrela. Para cada estrela, cuja temperatura de superficie 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

3100000

10000

1OMO

og 8

MO

Irradiação na luz visual, comparada com a do Sol

Sequência principal

Sol

g-gl-

F00002

30000

100002

20008

F.0009

8 8

4000

Fig. 2-5. Constelacion Plcude (Scieerelo). As estrelas mais caras pro vecum o brilha das masses de gas circundantes. Na foto, as nebulosis brilhan les encabrem a luz dienas que nchi e cicontram (Os quatro raios que.

loid, Em m des relas clans e o anel esférico vio devidos a deficien cias do sistematografico e tém a ver com as cerclas). Além das corelas C , VISIVI olho nu, Genglon'uido abrange mais de 100 outros componentes. Eles y avem a v do paco com velocidade igual: presumiVelichte, MCH Memo tempo.

Temperatura de superficie

po nititura de Tecnologia da California rrido Camarge de Wawungra: ro Healanda Oberdorimi Hale).

Fig. 2-3. O diagrama HR com a sequência principal (marcada no desenho com uma linha vermelhuil. Em cca ponto da vünca principal encontra-se. en dado luento, apenas estrelas de uma d CITILILLI M54. (O Seronomo us freqüentemente a massa do Sol como unidade de medico e a ela deu o simbolo Mo.)

*'*

100000

10000 -

Spica

Zeta de Cocheiro

Sirius A

Irradiação, comparada a do Sol

Sol

+ Sirius B

1000 +

Massa, comparada à do Sol

Fig. 2-4. Assinalando a intensidade de brilho na coluna à esquerda, de baixo para cima e a may estelar embaixo à direita, o diagram mostra as estrelas da seqüència principal numa faixa estreita: quanto maior a massa estelar. Lanto mais intenso o brilho. E o relacionamento mana Enirasidade de brilho. No enLanto, Yo vo vale para as estrelas da sequência principal. A indiação do - télite de Siru, o Sinus B, e inferior å irradiaço de uma estrela da vuência principal, de nasa identia:cle não corresponde a tal relacionamento,

As estrelas da seqüência 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 planctas 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 principio está exposto no Anexo C). As estrelas mais ricas em massa contém 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 seqüência principal, cuja massa pôde ser calculada com o auxilio dos seus satélites, obteve-se o seguinte resultado surpreendente: em cada trecho da seqüència principal sempre ha tão-somente estrelas de uma determinada massa (fig. 2-3). As estrelas da seqüència principal de pouca massa ficam na parte inferior, as de muita massa, na parte superior. Acompanhando-se a seqüência 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 licito estabelecer o seguinte: quanto mais intenso o brilho de uma estrela da seqüència principal, tanto maior o volume da sua massa. Quando, de duas estrelas da seqüència 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 seqüència principal. A figura 2-4 mostra como a luminosidade aumenta proporcionalmente à massa dessas estrelas. Na terminologia técnici esta norma é definida como relacionamento massa intensidade de brilho. Este relacionamento pode ser observado momente com as estrelas da seqüência principal, já conhecidas de nós, tais como o Sol, Sirius A e Spica, a anā branca Siritus B não segue esta regra, pois nem pertence à categoria das estrelas da seqüència 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 seqüência principal e mostra que as estrelas da sequência principal estão sujeitas ao relacionamento

*M75.51 niedade de brilho.*

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

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 ámbito das gigantes vermelhas; embaixo, à esquerda, estão 3 anās brancas.

Nesta última faixa situam-se 90% de todas as estrelas; por isso, os astrónomos chamam-na de sequência principal. Uma comparação com a figura 2-1 mostra que também o Sol, Sirtis e Spica estão nesta seqüència 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 seqüència principal, são denominadas pelo astrofisico de estrelas da seqüência prin cipal. Nas proximidades do Sol, elas representam, por assim dizer, as estrelas normais, ao passo que as gigantes e as anās fazem exceção à regra.

34

35

evolução estelar? Ai toma 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 seqüència principal encontramos uma ordem dessas caracteristicas externas, mas não sabemos como interpretá-las. Até imitamos a efemérida que coordenou os seres humanos, segundo uma determinada caracteristica, quica 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, poderiamos dar um palpite à efemérida. Poderiamos chamar sua atenção ao fato de grupos escolares serem freqüentados por alunos da mesma faixa etária. Com base neste saber, a cfemérida por deria determinar logo que o sexo e a cor da pele não são efeitos cvolutivos e que pessoas de sexo diverso e de cor da pele diversa não representam as várias faixas etárias de um só individuo. Outrossim, a efemérida notaria como a estatura do corpo está intimamente relacionada com a idade da pessoa. O astronomo fica em situação privilegiada quando detecta no céu a existència 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 Pleiades, constelação vulgarmente conhecida por Scie-estrelo (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 Pléiades estão reunidas em um espaco 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 diámetro ao redor do Sol, ha apenas umas 20 estrelas, fica evidente que, no caso das Pleiades, se trata de um legitimo aglomerado estelar. Aliás, as Pléiades 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 Pleiades tcriam passado por uma evolução idéntica; que nasceram juntas. 36

Fig. 2-6. Aglomerado cstclar esférico +7 de Tucano, fotografado com o espeTho Schmidi, de 1 m, do Observatório Europeu Sul, no Chile. Nele as estrelas se posicionam to ponto uma da outra que na região central nem aparexem 6irelas avulsas. Deurie, a foto di a impresio de 15 strelas e tocrem, muul mente, no centro.quando, na realidade, também lá estão muito afastadas umas das outils

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 nitida 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

37

1000

.

..

...

Irradiação na luz visual, comparada com a do Sol

Irradiação na luz visual, comparada com a do Sol -

20000°+

10000°

9000®

8000

**Fಲಿಯ**

6000o

5000° -

20000+

10000

9000

8000°

7000°

6000

Temperatura de superficie

- Temperatura de superficie

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

qüència principal.

Fig. 2-8. Diagrama HR da constelação das Hiades. Conquanto nas Pléiades (fig. 2-7) se encontrem estrelas da sequência principal, cuja irradiação equivale a até 1.000 vezes a irradiação solar, a vqüència principal das Hiades termine abaixo de 100 Yere a irradiação do Sol. Faltam as estrelas mais clans da se qüència principal: em compensacio, no diagrama HR data constelação hi um grupo de gigantes vermelhas.

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 superficie para as estrelas integrantes de tais aglomerados? Quiça 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 diferenca essencial. Existem, sim, aglomerados estelares, cujos integrantes efetivamente pertencem à seqüència principal, como a constelação das Pleiades (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

butos de estrelas da seqüência principal. Todavia, não se pode detectar a faixa completa da seqüència principal, pois ela está interrompida com a passagem de Strelas de brilho mais intenso. Faltam as estrelas da seqüència 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 Hiades (fig. 2-8). Aliás, a fig. 2-9 mostra um diagrama HR ainda mais nitido de um aglomerado estelar esférico. Ali, somente o trecho inferior da seqüència principal está ocupado, com os pontos marcando as estrelas mais brilhantes situados todos à direita. Este fenoHeno 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 seqüència principal aparece como um traço fino, com as linhas grossas, tracejadas, indicando a posicão das estrelas de diversos aglomerados. Nota-se como todos

38

39

Perseu

31000004

10000

1000 – 30MM

Pléiades

$

Hlades

20 MO

10 MOV

$

5MO

کی ، ط

Irradiação na luz visual, comparada com a do Sol -

2 M.

- - - -ě § §

Irradiação na luz visual, comparada com a do Sol

$

1 MO

-

31

20000

10000 –

8000 –

70000 -

6000o –

50009

3000°

30000

200002

10000°

8000

**Eart**

Temperatura de superficie

MO Temperatura de superficie

Fig. 2-9. Diagrama HR do aglomerado estelar M3; trata-se de um aglomerado estelar esférico, conforme mostra a lig 2-6. Aqui, somente as circlas, cuja ir radiacio equivale a 5 vezos a irradiação do Sol, que ainda se encontram SCqüència principal. Em sua maioria, as estrelas de brilho mais intenso no sio estrelas da sequência principal. Para trechos posteriores deste livro têm imporcancia, entre outras, as csirelas cuja irradiazio na luz visual e da ordem de 100 Yezes a irradiação solar, posicionadas em uma faixa horizontal, que se tende de uns 5.800 até 13,000°C, e que é chamada de rame borondal.

Fig. 2-10. Desvio de varios aglomerados otclares da seqüència principal (sezundo Allen Sandage). As linhas vermelhas, tracejadas, indicam o local onde

e situam as diversas constelacöe. Um aglomerado na constelação de Perseu mostra a seqüència principal mais evoluida, em direço ascendente, depois desvia-se para a direita. O aglomerado cstclar esferico M3 tem a sequência principal mais cuna, pois seu desvio se dá bem embaixo, à direitai. As scias a esquerda indicam onde se encontra estelas da seqüència principal, de determinada massa, com os algarismos nas suas especificando a massa múltipla do Sol. Por conseguinte, o aglomerado na constelação de Perseu ainda abrange cvielas de seqüència principal com 10 a 15 yes 2Missa solar, ao passo que as estrelas da sequencia principal mais ricas em ass, do aglomerado estelar cleric M3, possuem Lo-somente 1,3 da muss volar.

os aglomerados estelares tèm em comum um trecho da seqüència principal, mas "se desviam" para a direita e as estrelas de maior luminosidade já não se posicionam na seqüència principal, mas sim, à sua direita. Ademais, os pontos onde as linhas se desviam da seqüència principal são diferentes, de aglomerado em aglomerado. Como sabemos que, ao longo da seqüència principal, a massa aumenta em direção ascendente é licito dizer que, abaixo de um certo volume de massa, as integrantes de um aglomerado são estrelas da seqüència 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 superficie e na intensidade de

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 evoluido para uma anā branca, seu ponto no diagrama HR deslocar-se-ia de cima, å direita, para baixo, à esquerda. Se fossemos seres longevos, macrobios e, durante milhões e bilhões de anos, pudéssemos medir as estrelas e marcar seus respectivos pontos no diagrama HR, verificariamos 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.

40

1 milhão de anos

1000-30M

10 milhões de anos

100 milhões de anos

20MO

TOM.

1 bilhão de anos

8 - - - og så

5M /

3M.

Irradiação na luz visual, comparada com a do Sol

10 bi de anos

2 Mo

100 bi de anos

MO

| 100

bil de anos

30000"

20000

10000

8000

6000

No entanto, a imagem que se nos apresenta não passa de um instantánco e o diagrama mostra tão-somente onde as estrelas se encontram agora, neste instante". Neste contexto salta á vista como as estrelas na vizinhança do Sol vão se agrupando na seqüència principal. O que significa tal fenomeno? Talvez os pontos no diagrama HR levassem muito tempo para passar pela faixa da seqüència principal e até então ficariam parados por algum tempo? Ao ser observado um aglomerado de estrelas de idades diferentes, quiça 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, eiti 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 seqüència principal. Dele sabemos que, desde bilhões de anos, quase não mudou; logo, existem estrelas na seqüència 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 seqüència principal mantém a sua irradiação com a fusão do hidrogénio? Continuariam elas inalteradas — por ser esta uma fonte energetica altamente rentável — e seria esta a causa pela qual, no diagrama HR, as estrelas se agrupam na seqüència principal?

Suponhamos que todas as estrelas da seqüència 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 as estrelas brilharem. Supondo que 70% da massa estelar sejam de hidrogênio e que o esgotamento do combustivel nuclear se faça notar com a transformação de somente 10% do hidrogênio, para o Sol, encontramos uma expectativa de vida da or

4000

3000

- Temperatura de superficie

Fig. 2-11. Seqüència principal no diagrama HR. A querda, setas indicama posição de estrelas da seqüència principal de determinada masu Mo. Como a masa determina as reservas de energia nuclear disponiveis e como se conhece a intensidade de brilho para ada ponto da seqüencia principal, é possivel alcular o periodo para o qual uma curcia, cujo ponto estimarcado neste local, tem garantida a sua intensidade de brilho, por suas reservas de hidrogênio, Estos períodos são indicados pelas scias, a direita. Estrelas com mais de 30 vezes a massa solar dispõem de reservas de hidrogênio para um excesso milhão de anos. Por outra, circlas com mctade de massa solar tèm combustível suficiente pan quse 100 bilhões de anos. A comparacio com a fig. 2-10 permite avaliar a idade do aglomerado esclar.

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 seqüència principal, conforme mostra a fig. 2-3, pois, com base nesta fórmula, podemos calcular para cada estrela da seqüència principal, por quanto tempo a fusão de hidrogénio garantiria a sua luminosidade. O diagrama indica a intensidade de seu brilho; o relacionamento intensidade de briIho/massa, válido para as estrelas da seqüència principal, conforme fig. 2-4, permite-nos calcular a massa correspondente å respectiva intensidade de brilho. A comparação entre a energia nuclear, armazenada nessa massa, e a intensidade de brilho – ou seja, a energia irradiada psegundo, no universo - indica

Ou melhor, em termos mais precisos: vimos onde tam posicionadas gundo a lw por mis recchida hoje por clas lo emitida. Contudo, para quis da colução eyelar da nosa Via-Liicte, é muito breve o tempo que au leva em sua caminhada até a Terra, em comparado com os enormes espaços de tempo que as estrelas percorrem em sua evolução, de modo que tal difeгегиа риншо іпорнопа.

42

43

a duração do tempo útil dessas reservas energéticas, até o seu esgotamento. A fig. 2-11 especifica, na seqüència 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 seqüència principal, tanto mais acelerado o seu gasto de energia e por um periodo proporcionalmente menor duram as suas reservas de hidrogénio.

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 ein comum. Eis, quanto maior a massa, tanto mais reduzida a expectativa de vida!

**A Idade dos Aglomerados Estelares**

Se imaginarmos um grupo estelar da seqüència principal, de massas diversas mas igual idade, com todas elas alimentadas pela fusão do hidrogènio, deveremos supor que os efeitos de esgotamento surgiriam primeiro em cima, na seqüència 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 massi 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 Hiades, conforme mostra a fig. 2-8. A seqüència 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 hidrogenio, ao passo que estrelas de massa menor ainda disporiam de reservas suficientes para garantir a sua subsistència. Seria este o motivo pelo qual o trecho superior da seqüència principal das Hiades está desocupado?

Outros aglomerados estelares abandonam a seqüència principal quando atingem uma intensidade de brilho diferente e com isto, um outro volume de massa. Por exemplo, as Pléiades ainda abrangem estrelas da seqüència 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 Pléiades não se posicionam exatamente na seqüència 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 seqüència principal está ocupada. A fig. 2-10 esquematiza, para vários aglomerados estelares, os pontos nos quais eles abandonam a seqüència principal. Um aglomerado na constelação de Perseu é o mais novo; ali, a seqüència principal tem até 1.000 luminosidades solares e sua idade é de 10 milhões de anos. Em seguida vêm as Pleiades, depois as Hiades e, por fim, aparece o antigo aglomerado estelar esférico M-3. Neste último aglomerado, a seqüència principal está ocupada por estrelas de até très luminosidades solares: as estrelas da seqüència principal mais claras tēm 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 teriamos compreendido uma boa parte da evolução estelar. Se assim for, uma estrela continuaria na seqüència principal até esgotar-se o seu hidrogénio e, depois, deslocar-se-ia para a direita, penetrando no ámbito das gigantes vermelhas, visto que as estrelas que abandonaram a seqüència principal ficam à direita. Se este raciocinio 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 tomam 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 hides segundo a qual as propriedades das estrelas, integrando um aglomerado, esta riam 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 temperatur ras e densidades no interior da estrela senam suficientes para produzir uma reação nuclear e fazer a estrela funcionar como

14

15

uma usina atómica. Em todo o caso, as temperaturas da superficie 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 superficie. 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.