

5 — O *Curriculum Vitae* do Sol

O hélio é a cinza deixada pela combustão do hidrogênio. Enquanto o Sol primordial emite, da sua superfície, radiação energética para o universo, no seu interior, o hidrogênio é transformado em hélio. No decorrer do tempo, o consumo de hidrogênio aumenta constantemente. Para o modelo do Sol primordial supúnhamos que ele fosse constituído uniformemente de uma matéria rica em hidrogênio. Acontece, porém, que o hélio recém-formado vai enriquecer a região central do nosso astro solar e, assim sendo, em breve o modelo fornecido pelo computador deixará de estar correto.

Do Sol Primordial ao Sol Atual

Quando se calcula o modelo de uma estrela da seqüência principal, chega-se a conhecer a quantidade de energia gerada em cada ponto da sua região central, mediante a fusão do hidrogênio. Logo, também se sabe quanto de hélio é produzido ali, a cada segundo. No centro do Sol primordial, em cada quilograma de matéria se origina 1 décimo de 1 milionésimo de hélio novo, por ano. Por conseguinte, ao calcular para cada ponto da estrela a quantidade de hélio lá originada, ao término de 1 milhão de anos, conhece-se a composição química de um modelo do Sol, reproduzindo o nosso Sol de há 1 milhão de anos, da data do início da fusão do hidrogênio.

Ao se programarem no computador os dados da composição química, ligeiramente alterada na região central, ele pode elaborar um novo modelo de estrela; pois, lá onde agora a porcentagem de hélio aumentou, as propriedades do material mudaram um pouco. A permeabilidade da radiação ficou alterada e as reações nucleares já não dispõem mais de tanto hélio quanto havia no Sol primordial. O modelo de estrela, recém-calculado, reproduz as condições do Sol há 1 milhão de anos, após o início das reações nucleares. É pouco diferente do Sol primordial, visto que o período de 1 milhão de anos é nada em comparação com os bilhões de anos, ao longo dos quais o Sol se serve de seu combustível. Por conseguinte, a temperatura de superfície do novo modelo continua quase a mes-

ma que a do Sol primordial, somente a sua irradiação é um pouco mais intensa. Apesar de agora haver menos hidrogênio no centro, o novo modelo acusa leve elevação de temperatura nas regiões centrais do astro e, por causa disso, agora lá está sendo gerado um pouco mais de energia do que antes.

O novo modelo do Sol também indica onde a energia está sendo liberada e quanto hidrogênio está sendo lá transformado, por segundo. Portanto, continuamos a ter condições de especificar como será a composição química, 1 milhão de anos mais tarde. E podemos encomendar ao computador um novo modelo de estrela, para esta mistura dos elementos químicos.

Destarte, o computador pode fornecer um modelo do Sol após o outro. Como, para cada modelo, conhecemos também a temperatura de superfície e a intensidade de brilho, um modelo após o outro pode ser marcado no diagrama HR. Desta maneira, a partir do ponto marcando o Sol primordial, surge no diagrama uma cadeia de pontos, descrevendo como, durante a sua evolução, o Sol avança pelo diagrama HR, indicando as suas diversas fases evolutivas. A fig. 5-1 mostra esse percurso e, em vários pontos, está marcado o tempo que se passou desde o início da fusão do hidrogênio.

A fase evolutiva do nosso Sol, reproduzida no computador, passa no diagrama pelo ponto que indica a posição atual do Sol. Com isto tornamos a verificar aquilo que, em outra parte, já foi dito sobre o modelo do Sol primordial, ou seja, a diferença entre as propriedades do Sol primordial e do Sol atual representa um efeito de desenvolvimento. Somente com a existência do hélio enriquecido, na região central, nosso modelo do Sol adquire as propriedades do Sol atual. Com tal base, achamos lícito considerar como corretos os nossos cálculos do Sol. Por outro lado, com isto também chegamos a averiguar a idade do Sol legítimo. A cadeia de modelos de estrelas, desde o Sol primordial até o Sol atual abrange um período de 4,5 bilhões de anos; é esta a idade do nosso Sol. Levou todo esse tempo para o Sol primordial evoluir para o Sol atual. Todavia, antes de prosseguirmos e indagarmos sobre o futuro, vamos tratar do Sol que hoje em dia brilha no firmamento.

Podemos aproveitar o ensejo de dar uma olhada no interior do Sol, com a ajuda do seu modelo fornecido pelo computador. A fig. 5-2(b) mostra o nosso modelo do Sol atual; vamos compará-lo com o Sol primordial, da fig. 4-2(a). Não há diferenças essenciais entre os dois. Ambos têm uma camada externa de propagação, enquanto o transporte de sua energia, a partir do centro, é efetuado por radiação. A fusão do hidrogênio processa-se na cadeia próton-próton. Também, de modo

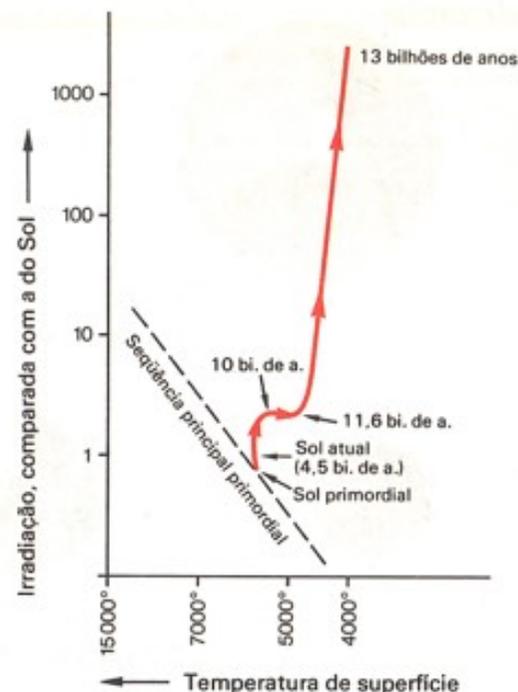
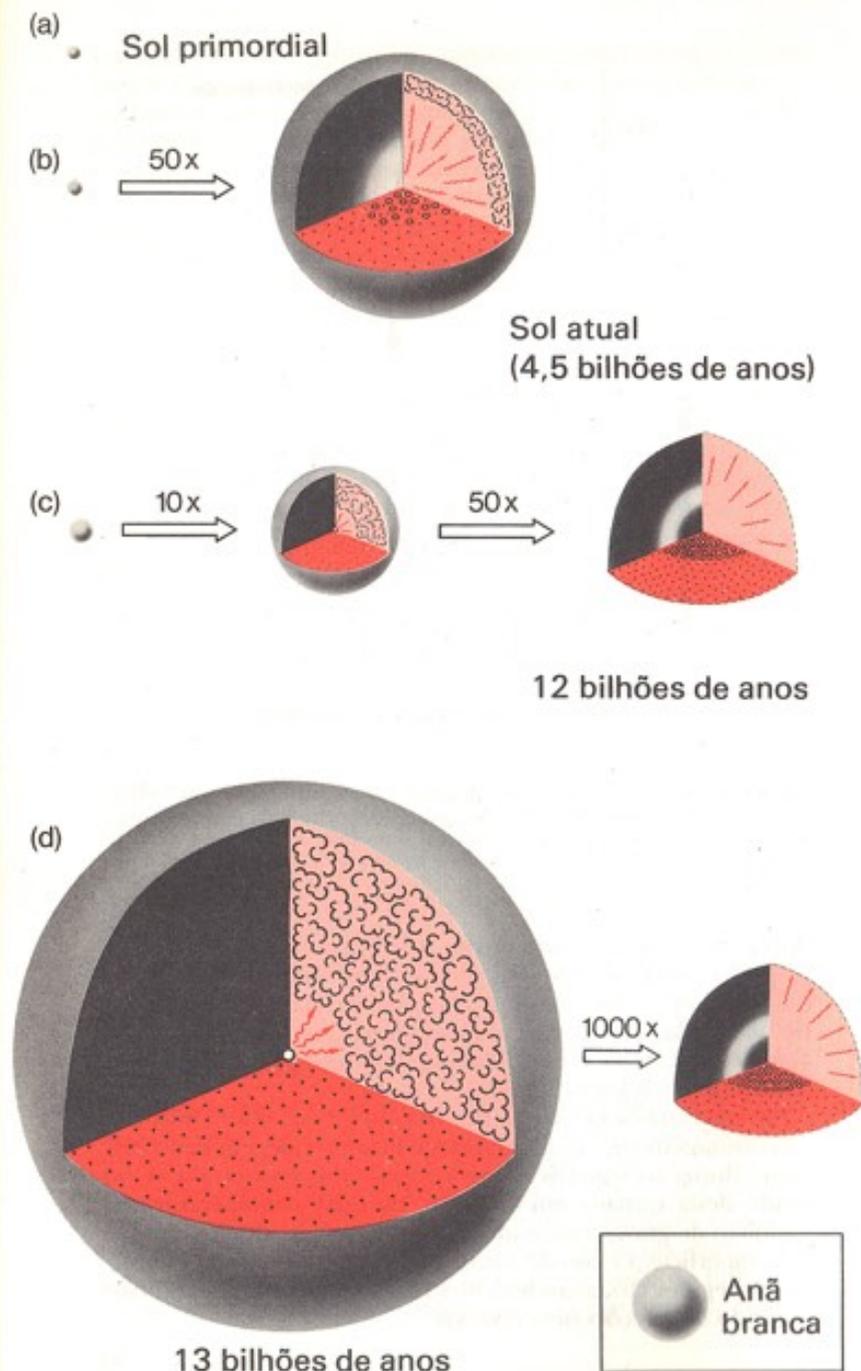


Fig. 5-1. Fases evolutivas do Sol, no diagrama HR. A partir do Sol primordial, desenvolvimento processado até o Sol atual, desviando-se da seqüência principal primordial para a região das gigantes vermelhas. As indicações de idade marcam o tempo que se passou, desde a ignição do hidrogênio, no Sol primordial.

diferente do que aconteceu com o Sol primordial, o Sol atual já possui hélio recém-formado, enriquecendo a sua região central. Embora nas suas camadas externas haja somente 297 g de hélio p/kg de matéria, no centro há 590 g de hélio p/kg; assim sendo, desde o início da fusão do hidrogênio, foram originadas umas 300 g de hélio.

Em sua camada externa, a matéria estelar está sendo misturada constantemente. Cada grama de matéria que, em dado instante, flutua na superfície, uns tempos atrás encontrava-se no fundo desta camada em ebulição, na qual a temperatura de 1 milhão de graus centígrados é 170 vezes mais elevada do que a da superfície. O fato de a zona de propagação atingir efetivamente regiões tão incandescentes foi-nos sugerido por indícios partindo de direções bem diversas.



Onde Está o Deutério do Sol?

O deutério, um isótopo de hidrogênio, tem em seu núcleo atômico um próton e um nêutron. Nas estrelas, não é muito resistente ao calor. Bastam 500.000 °C para fazê-lo entrar em fusão com os núcleos do hidrogênio normal e transformá-lo em um isótopo de hélio. O deutério existe na Natureza em quantidades pequenas, por exemplo na matéria interestelar, da qual nasceram os astros. Deve ter presenciado a formação do Sol, pois seus vestígios podem ser comprovados na Terra. Normalmente, talvez na água dos oceanos, em 5.000 átomos do hidrogênio comum há um átomo de deutério.

Na atmosfera solar este isótopo está faltando. Isto não é nada surpreendente, pois os nossos modelos de computador indicam que nem pode haver deutério nas camadas externas do Sol. Mais cedo ou mais tarde, o movimento ascendente e descendente da matéria levaria cada átomo de deutério da superfície solar para o fundo da zona de propagação, onde a temperatura é de 1 milhão de graus centígrados. Muito antes de lá chegar, transformar-se-ia em hélio, com a ajuda de um núcleo de hidrogênio. Portanto, no desenrolar da evolução do Sol, todo o deutério teria sido destruído, desde há muito. Mesmo se, hoje em dia, de qualquer parte do universo, o deutério se precipitasse sobre o Sol, dois ou três anos mais tarde já teria sido levado para o fundo e destruído.

O Problema do Lítio

Os nossos modelos de computador não conseguem explicar

Fig. 5-2. Composição interna de modelos solares, nas diversas fases de sua evolução. O desenho é o mesmo da fig. 4-2. Agora, em comparação com figuras anteriores, temos regiões enriquecidas de hélio; pequenos círculos assinalam o hélio recém-formado. Em parte, ainda estão misturados com a matéria primitiva, rica em hidrogênio, assinalada por pontos. Mais tarde, há somente hélio na região central. À esquerda, os desenhos dos modelos estão todos em escala uniforme (porém, não na escala da fig. 4-2, à esquerda); à direita, as regiões internas estão ampliadas. Para cada desenho indica-se a escala da ampliação. (a) Sol primordial, (b) Sol atual. O modelo (c) já tem em seu centro uma esfera de hélio, formada depois de esgotado o hidrogênio. A combustão nuclear processa-se agora dentro de uma calota esférica, delgada, envolvendo a esfera de hélio. O modelo (d) mostra o Sol como gigante vermelha, com uma espessa zona de convecção, externa, e relativamente pequeno núcleo de hélio, cujas dimensões antes lembram uma anã branca. A título de comparação, a anã branca aparece à direita, na escala do interior da estrela do desenho (d), mil vezes ampliada.

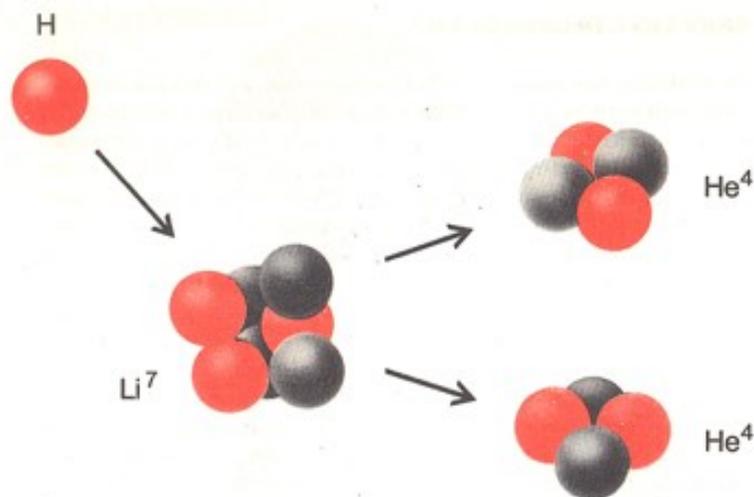


Fig. 5-3. A temperaturas de 3 milhões de graus centígrados, no interior da estrela, os átomos de lítio transformam-se em hélio, com a ajuda de núcleos de hidrogênio.

tudo. Ao estudar a composição química da superfície solar, nota-se que — em comparação com aquilo que nos é familiar aqui na Terra — ainda há um outro elemento muito raro, ou seja, o lítio. Esta substância pertence aos elementos mais leves, com três prótons e quatro nêutrons formando normalmente seu núcleo atômico; é muito raro no Sol. Em comparação com sua ocorrência na Terra, mas mesmo com a matéria proveniente do universo e que se precipita sobre o globo terrestre na forma de meteoritos, o quilograma de matéria solar contém lítio em quantidade cem vezes menor. Será que também este elemento teria sido destruído pelas temperaturas elevadas no fundo da camada de propagação?

Efetivamente, o lítio pode receber um núcleo de hidrogênio e, com isto, dividir-se em dois átomos de hélio, conforme mostra a fig. 5-3. No entanto, a temperatura de 1 milhão de graus centígrados, à qual os átomos de lítio se misturam e confundem na superfície solar, não daria para destruí-los; isto aconteceria tão-somente nas camadas mais internas, onde a temperatura é três vezes mais elevada. Como todos os modelos fornecidos pelo computador, desde o Sol primordial até o atual, não revelam zonas de convecção penetrando mais no interior da estrela, os nossos cálculos não conseguem explicar a carência de lítio no Sol. Será que faltou, desde sempre? Presu-

me-se que o Sol, os planetas e os meteoritos foram feitos do mesmo tipo de matéria; portanto, inicialmente, tiveram a mesma composição química. Trataremos do assunto em outra parte, quando estudarmos a origem das estrelas. Por conseguinte, onde ficou o lítio do Sol? De que maneira resolveremos este problema?

A saída para este impasse está nos tempos anteriores ao Sol primordial, na época após a formação das estrelas e antes da queima do hidrogênio. Naquele período, a zona de convecção do Sol penetrou bem mais fundo nas regiões incandescentes do interior solar, onde a temperatura era de 3 milhões de graus centígrados no mínimo, quando a maior parte do lítio, existente nas camadas externas do Sol, foi levada para dentro e ali agitada e destruída. No Capítulo XII trataremos do assunto com maiores detalhes. Todavia, para tanto, é preciso sabermos primeiramente o que havia antes do Sol primordial. Por enquanto ainda estamos estudando o processo de envelhecimento do Sol; mais tarde cogitaremos dos seus anos de adolescência.

Somente nos anos 50 ficou elucidado o destino de estrelas semelhantes ao Sol, após o esgotamento de suas reservas de hidrogênio, conforme as fases evolutivas da fig. 5-1. Foi então que, pela primeira vez, meios eletrônicos de cálculo vieram a ser usados em escala maior, nos estudos sobre o desenvolvimento estelar. Todavia, antes de tratar dos resultados obtidos, eu gostaria de relatar uns dados históricos e em parte pessoais, meus.

1955, Avanço no Domínio das Gigantes Vermelhas

Naquele ano, dois astrofísicos, renomados em seu tempo, publicaram um trabalho de sua autoria. Por ter sido muito volumoso não coube nas edições regulares do "Astrophysical Journal" e saiu em seqüência de edições suplementares, publicadas concomitantemente. Um desses autores era Fred Hoyle, o outro, Martin Schwarzschild. Hoyle, na época catedrático em Cambridge, já havia publicado grande número de trabalhos importantes, tais como, estudo sobre a origem dos elementos químicos nas estrelas. Além disso, nas horas vagas, Hoyle também escreveu romances de ficção científica. O seu "Nuvem Negra" foi traduzido para vários idiomas e até levado ao ar, como radionovela, pela Rádio Alemã. Quanto ao outro autor, era filho do astrônomo Karl Schwarzschild, de quem falaremos em outra parte, e tinha 4 anos quando seu pai faleceu. Desde

criança, Martin interessava-se por Astronomia e, como ele próprio comentou mais tarde, por muito tempo sua futura carreira de astrônomo teve por obstáculo sua vocação infantil de ser entregador de leite. O fato de, afinal das contas, ter ficado com a Astronomia foi explicado por Martin como uma aparente carência de imaginação e originalidade, que não lhe permitiu escolher outra profissão senão a exercida pelo pai. Em 1935, formou-se na Universidade de Göttingen. Comentou-se que os Schwarzschild e os Rothschild seriam da mesma rua, do gueto judeu em Frankfurt-sobre-o-Meno; assim sendo, para o jovem astrônomo foi de importância vital abandonar o território do III^o Reich quanto antes. E, de fato, pouco após a partida de Martin, um irmão seu que lá ficou morreu assassinado. Martin Schwarzschild tomou o caminho da Noruega para chegar aos EUA, onde após a Segunda Grande Guerra, assumiu uma cátedra em Princeton.

Nos anos do pós-guerra, a Escola de Princeton, inaugurada por Schwarzschild, promoveu a construção de modelos de estrelas da seqüência principal, bem como estudos sobre o comportamento das estrelas na época do esgotamento de suas reservas de hidrogênio. Um grande avanço foi logrado com o trabalho concluído em 1955, calculando e demonstrando, pela primeira vez, como estrelas, a partir da seqüência principal, se tornam Gigantes Vermelhas.

Naquela época, começou a ser usada a computação em grande escala na Astrofísica e, com seu auxílio, Hoyle e Schwarzschild simularam o desenvolvimento dos astros. Pouco mais tarde, também tive ensejo de enveredar pelos caminhos assim abertos.

No outono europeu de 1957, Stefan Temesvary, agora catedrático em Tübingen, Alemanha Federal, e eu passamos muitas noites em claro, na rua Böttinger, em Göttingen, diante do G-2, um computador construído por Heinz Billing e seus colaboradores no Instituto de Física Max Planck. Naquela época, os computadores ainda não estavam à venda nas lojas especializadas, mas tiveram de ser construídos nos respectivos institutos científicos. Hoje em dia, calculadoras de mesa, programadas, são capazes de equacionar problemas, outrora equacionados com uma aparelhagem que enchia a sala toda e, com seus tubos, ainda servia para aquecer o ambiente. Ludwig Biermann, na época diretor do Departamento de Astrofísica do Instituto Max Planck, encarregou-nos de repetir com aquele computador os cálculos feitos por Hoyle e Schwarzschild; para tanto usamos um processo aritmético aprimorado por nós elaborado.

Ao comparar a maneira como então se trabalhava com os métodos atuais, nota-se o enorme progresso feito nesses últimos anos. A fim de obter modelos de estrelas, era preciso, então, começar com quaisquer valores de referência para a intensidade de brilho e a temperatura de superfície, e, a partir disso, prosseguir calculando, passo a passo, em direção do interior da estrela até chegar perto do seu centro e perceber que, além desse ponto, o modelo perderia seu sentido, ou, em termos técnicos, lá não haveria mais condições para atender às exigências periféricas internas. Em seguida, todo o cálculo teve de ser repetido, com base em valores aprimorados para a intensidade de brilho e a temperatura de superfície, na esperança de, dessa vez, poder atender melhor às exigências internas. Destarte, eram necessárias numerosas "integrações", a partir da superfície da estrela até o seu centro, para, enfim, obter um modelo razoável. Sempre vivemos uma viagem através da estrela, ao computar esses nossos cálculos, que costumavam levar cinco horas; durante todo esse tempo, torcemos para que o computador trabalhasse sem falhas, pois, do contrário, teríamos de começar tudo de novo. Hoje em dia, o computador, saído daquele mesmo Instituto de Física Max Planck, entretidamente transferido para Munique, elabora um modelo de estrela em uns poucos segundos. Tal avanço fantástico não é somente o mérito do computador, mas também deve ser creditado a um cientista e a seus colaboradores, em Berkeley.

No entanto, disto só falaremos no próximo capítulo. Por ora, trataremos do esgotamento das reservas de hidrogênio em estrelas semelhantes ao Sol. É o destino do nosso Sol e, conforme veremos, ele influi igualmente no futuro dos habitantes deste nosso planeta, a Terra.

O Futuro do Sol

E como será daqui por diante? O que acontecerá quando sempre mais hidrogênio se transformar, sempre mais hélio se formar no centro do Sol? Os cálculos dos modelos estelares indicam que, por enquanto, isto é nos próximos 5 bilhões de anos, nada de muito importante acontecerá. Conforme mostra a fig. 5-1, lentamente o Sol se desloca para cima, em suas fases evolutivas, conforme demonstradas no diagrama HR, ou seja, sua irradiação ganha em intensidade, sua superfície fica um pouco mais quente, para depois resfriar-se ligeiramente. Porém, não há grandes mudanças a esperar.

Passados 10 bilhões de anos após a fase do Sol primordial,

a intensidade de seu brilho dobrará, em comparação com os valores atuais. Naquele futuro remoto, desde há muito, a humanidade — supondo que ainda ela exista — experimentará dificuldades de ordem climática, mas coisas piores estão por acontecer. O Sol terá o seu diâmetro aumentado para o dobro do atual.

Entrementes, no interior do Sol houve mudanças essenciais. No centro, o hidrogênio foi totalmente consumido e uma esfera de hélio enche toda a região central. (A fig. 5-2(c) dá o modelo do Sol com a idade de 12 bilhões de anos.) Por enquanto, lá não pode mais haver queima nuclear, porque todo o hidrogênio foi consumido e a temperatura é muito baixa para a fusão do hélio (fig. 3-4). Somente na superfície da esfera de hélio, lá onde o hélio está beirando matéria ainda contendo hidrogênio, a fusão do hidrogênio continua. Com isso, é queimado o hidrogênio restante e integrado à esfera de hélio, cuja massa aumenta constantemente. Enquanto, até então, o hidrogênio era queimado na região central do nosso Sol, dali por diante a combustão do hidrogênio se dá dentro de uma área em constante expansão, dirigida para as camadas externas, ainda ricas em hidrogênio. À medida que o tempo avança, aumenta a massa da esfera de hélio, no centro solar.

No diagrama HR, o astro vai se deslocando para cima, para direita, no âmbito das gigantes vermelhas. Daqui a 13 bilhões de anos, o diâmetro do Sol será umas cem vezes o atual e seu brilho será duas mil vezes mais intenso; concomitantemente, a temperatura de sua superfície terá baixado para uns 4.000°C, 1.800°C abaixo da sua temperatura atual.

Todavia, com isto a humanidade não se salvaria, pois, desde há muito, a água dos oceanos terrestres teria evaporado; o chumbo ter-se-ia derretido ao Sol. A Terra ter-se-ia tornado uma fornalha superaquecida; toda a vida estaria extinta. Um Sol vermelho, imenso, ocuparia mais da metade do firmamento diurno e emitiria seus raios para uma superfície terrestre, desde há muito deserta, vazia, sem vida. Por fim, quando se chega a este ponto é que se quer saber se aquilo que o computador calculou realmente corresponde aos fatos.

Nossas observações deram uma descrição correta do Sol atual e de suas propriedades principais. Seria lícito concluir disso que sejam acertadas também as previsões para o futuro, com todas as suas implicações dantescas? Para tanto, temos uma prova imediata. Ao observarmos no diagrama HR um aglomerado estelar esférico, conforme mostra a fig. 2-9, notamos como lá a seqüência principal está vazia até o âmbito dos corpos celestes de umas três vezes a intensidade de brilho solar,

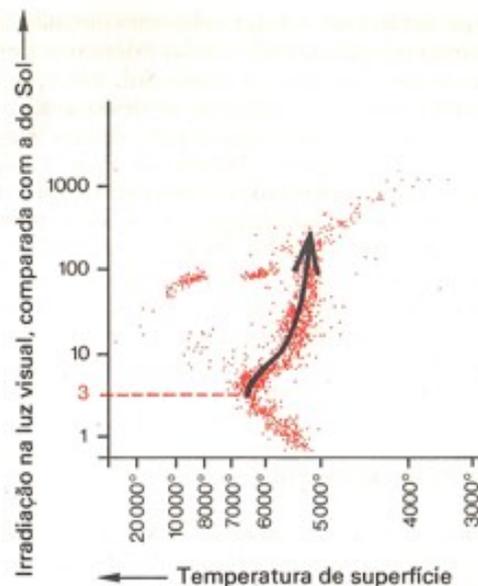


Fig. 5-4. Diagrama HR de um aglomerado estelar esférico da fig. 2-9, agora com uma via evolutiva (em preto), mostrando como as estrelas da seqüência principal passam para a região das gigantes vermelhas. Por causa da massa pouco diferente das estrelas que abandonaram a seqüência principal (neste aglomerado, estrelas com massa igual à solar ainda continuam na seqüência principal), bem como por causa da composição química um pouco diferente das estrelas no aglomerado estelar esférico e ainda da irradiação global e irradiação na luz visual, a via evolutiva, aqui ilustrada, não pode ser comparada quantitativamente com a via indicada para o Sol, na fig. 5-1. Nota-se também, sob o aspecto qualitativo, que as estrelas neste aglomerado estelar esférico encontram-se em uma fase avançada, ainda a ser atingida pelo nosso Sol.

o qual corresponde a objetos de 1,3 massa solar. Por conseguinte, as estrelas mais claras da seqüência principal nesse aglomerado já consumiram o hidrogênio armazenado em seu centro. As estrelas de aproximadamente 1,3 massa solar e mais encontram-se sobre um ramo que, em cima, à direita, parte da seqüência principal e leva para o domínio das gigantes vermelhas, estrelas cuja evolução se assemelha à do Sol, conforme prevista por nossos cálculos, e que dele se distinguem muito pouco em sua massa.

Assim sendo, na fig. 5-4, no diagrama HR desse aglomerado estelar esférico, marcamos em vermelho as fases da evolução

de um astro parecido com o Sol. Evidentemente, não há dúvida de que as estrelas no aglomerado estelar esférico se desenvolverão da maneira prevista para o nosso Sol, em época futura. Ali temos estrelas que, no diagrama, se deslocam, justamente agora, em linha vertical para cima e para direita, conforme o prevemos para o Sol, daqui a 8 bilhões de anos. Essas estrelas estão em fase evolutiva adiantada em relação ao Sol e mostram, desde hoje, o que se passará com o nosso astro principal. E, caso em órbita dessas estrelas haja planetas que, talvez, outrora eram portadores de vida, desde há muito tal vida deve estar extinta, com todos os seus vestígios queimados, calcinados nas torrentes de brasa, emitidas por aqueles astros. Assim sendo, lamentavelmente as observações efetivas confirmam o acerto das nossas previsões para o futuro do Sol.

Neutrinos Provenientes do Sol

Obtivemos um Sol, reproduzido em computador, com as propriedades conforme são observadas, e o diagrama HR do aglomerado estelar esférico mostra que está correto este nosso prognóstico para o Sol, não obstante suas horríveis implicações para a humanidade. Para os astrofísicos, o mundo parece estar em boa ordem. No entanto, infelizmente, há um senão, pois sempre eles devem ouvir dos físicos nucleares que, talvez,

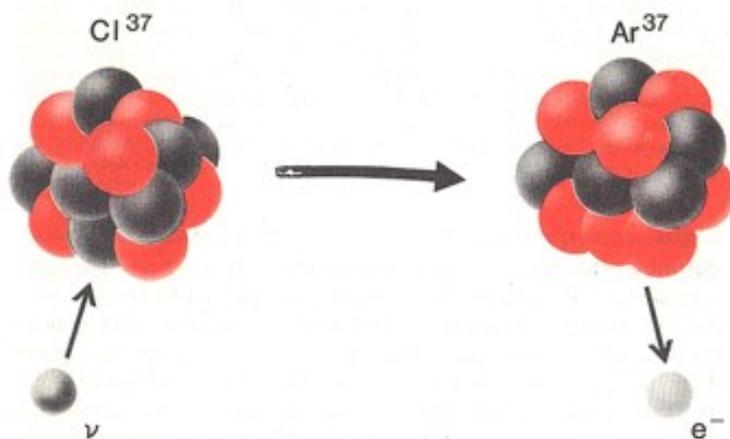


Fig. 5-5. Um neutrino é capaz de transformar um átomo de cloro em um átomo de argônio, liberando um elétron durante o processo.

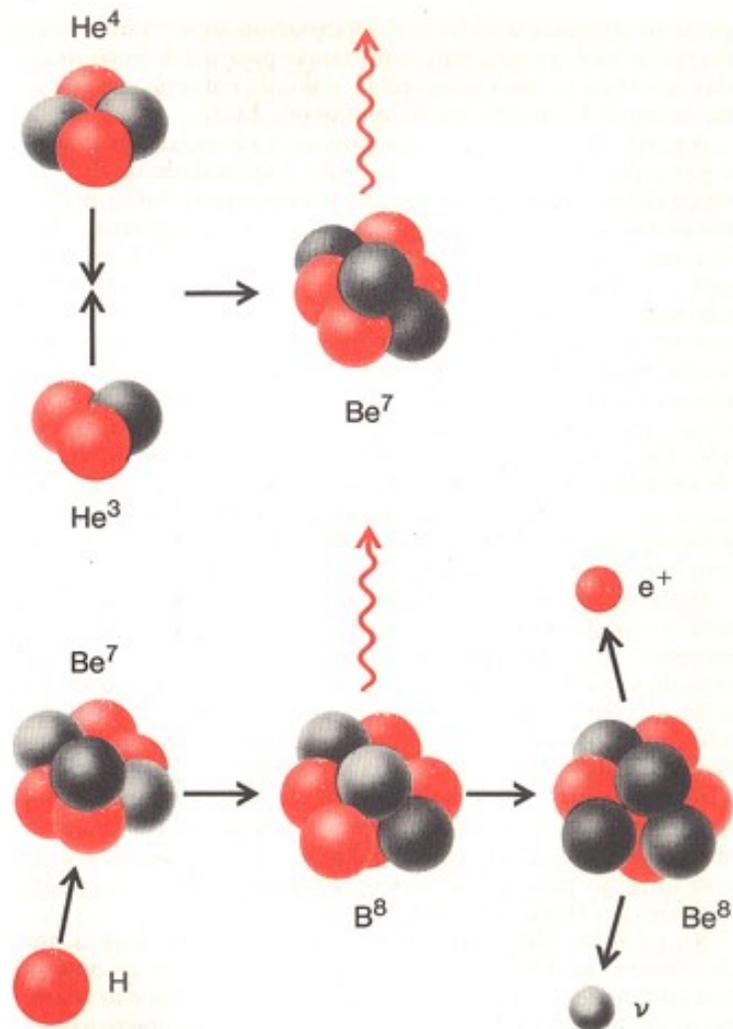


Fig. 5-6. Em uma cadeia secundária da reação próton-próton (vide fig. 3-3) forma-se um isótopo Be^7 radioativo, que emite um pósitron e um neutrino rico em energia. As setas vermelhas, onduladas, indicam a emissão de quanta de luz.

suas idéias sobre a vida dos astros não sejam tão corretas assim e quiçá seus modelos de computador estejam totalmente errados.

Tais dúvidas são motivadas por uma partícula hipotética,

produto secundário da fusão do hidrogênio ao ser transformado em hélio e, a rigor, sem importância para o Sol. Essas dúvidas nasceram de uma experiência realizada em uma antiga mina de ouro, desativada, em South Dakota, EUA.

A partícula em questão é o neutrino; é eletricamente neutro e praticamente sem massa e se move à velocidade da luz. Na descrição da cadeia próton-próton, vimos como a fusão de dois núcleos de hidrogênio produz um pósitron e um neutrino (fig. 3-3, em cima). Logo o pósitron se une a um elétron, dando origem a 1 quantum de luz. O neutrino segue rumos diversos, ele não reage a outras partículas e, assim sendo, voa em linha reta, sem ser desviado de sua rota, para o lugar de sua origem, desenvolvendo velocidade igual à da luz. A matéria solar circundante não tem influência no neutrino; para esta partícula a matéria solar nem existe. A fim de proteger-se de um neutrino, em vôo direto na nossa direção, seria preciso esconder-se detrás de uma muralha, cuja espessura, especificada em quilômetros, daria um número de 15 algarismos. Felizmente, não é preciso proteger-nos dos neutrinos, pois eles passam por nosso corpo sem fazer mal a um só átomo do nosso organismo.

Destarte, os neutrinos originados no centro do Sol atravessam o espaço em vôo linear e também alcançam a superfície terrestre; tanto faz, que seja de dia ou de noite. De dia, eles vêm de cima e de noite, vêm de baixo, atravessando o globo terrestre, sem encontrar qualquer obstáculo. Se houvesse um telescópio para neutrinos, com o qual se tornassem visíveis, no centro do disco solar apareceria uma pequena mancha clara, a região central, onde se processa a reação próton-próton, dando origem aos neutrinos. Tal telescópio mostraria a mancha clara também de noite, com o Sol posto; para tanto, seria preciso dirigi-lo para o Sol, abaixo do horizonte, pois, para tal telescópio, a Terra seria transparente.

No entanto, não existe um telescópio para neutrinos; a fim de construí-lo deveríamos ter condições de desviar os neutrinos com lentes ou espelhos, de maneira como a luz é desviada no aparelho fotográfico, ou os elétrons o são no microscópio eletrônico. Acontece, porém, que os neutrinos se deslocam sempre em vôo linear.

Todavia, há um tipo especial de átomos, oferecendo certa resistência, mesmo diminuta, aos neutrinos. O mais famoso é o isótopo do elemento cloro, ou seja, o Cl^{37} . Se há átomos que possam parar os neutrinos, então seriam os do cloro. Isto quase nunca acontece, mas quando ocorre, uma vez ou outra, o átomo de cloro engole o neutrino em seu vôo e, em compensação dá um elétron do seu núcleo, produzindo, assim, um nú-

cleo atômico do elemento argônio (fig. 5-5). O átomo de argônio, assim produzido, não é o átomo normal do gás nobre, mas sim um isótopo que, depois de uns 35 dias, torna a assumir sua forma primitiva. Baseado nisso, Ray Davis efetuou a sua famosa experiência com o neutrino solar; famosa também pelo fato de, entre outras coisas ser bastante incômoda para os astrofísicos. No entanto, antes de descrevermos essa experiência, cumpre salientar mais outra dificuldade.

O átomo de cloro reage tão-somente a neutrinos ricos em energia e os neutrinos produzidos pela reação próton-próton possuem pouca energia. Nada podem com os átomos de cloro. Com isto, até poderíamos encerrar as nossas reflexões a respeito dos neutrinos solares, se não houvesse no Sol uma fonte de neutrinos ricos em energia. Em combinação com a cadeia próton-próton processa-se uma série de reações secundárias, sem importância para a geração de energia do Sol e que, por causa disso, nem cabe mencionar aqui. Entre essas reações há uma que se repete com frequência tanto maior quanto mais hélio for produzido. A fig. 5-6 mostra essa reação. Um átomo normal de hélio, de número de massa 4, encontra-se com um isótopo de hélio, de número de massa 3, produzindo o berílio, de número de massa 7. Quando tal átomo radioativo, antes de desintegrar-se, depara com um núcleo de hidrogênio, desta união nasce um isótopo de boro, de número de massa 8. Tal átomo de boro é também radioativo e, depois de algum tempo, torna a retransformar-se em um átomo de berílio; nessa metamorfose elimina um pósitron e um neutrino, altamente energético.

Esses neutrinos estão rigorosamente certos para a reação do cloro! Também eles traspassam a massa, praticamente desimpedidos, mesmo grandes volumes de massa de cloro; no entanto, de tempo em tempo, mas muito raramente, os átomos de cloro reagem aos neutrinos que por eles passam. É esta a base na qual foi feita a experiência supracitada.

Ray Davis faz Experiências com Neutrinos

É possível construir um detector de neutrinos solares. Lamentavelmente, ele detecta apenas os neutrinos produzidos por uma reação pouco importante para a Astrofísica, a saber, a cadeia secundária berílio-boro. Os neutrinos originados da reação próton-próton, de importância vital para o Sol e, por conseguinte, também para nós, passam por ele despercebidos. Todavia, supondo que os nossos modelos do Sol estejam corre-

tos, deveria ser possível comprovar a existência de neutrinos de boro ricos em energia.

Davis ideou a seguinte experiência. Dentro de um tanque, enterrado na terra, a 1.500 m de profundidade, e envolto por um espesso manto de água, para evitar toda reação perturbadora, estão armazenados 390.000 l de percloroetileno. Este líquido está sendo usado principalmente nas lavanderias e é parente do tetracloreto de carbono. Cada molécula deste agente químico contém 4 átomos de cloro, dos quais, em média, um é o isótopo Cl^{37} , sensível ao neutrino; representa a maneira mais econômica e cômoda de concentrar muitos átomos de cloro dentro de um espaço diminuto. Ali, os átomos recebem a radiação constante dos neutrinos, provenientes do Sol. Quase sempre, nada acontece. Os numerosos neutrinos, provenientes da reação próton-próton e ricos em energia, costumam circular pelo tanque, sem encontrar qualquer obstáculo. Somente os neutrinos, originados da desintegração do cloro e igualmente ricos em energia, ficam sujeitos a eventualmente serem capturados. Uma estimativa do número de neutrinos ricos em energia, feita com base nos modelos do Sol, computados pelos astrofísicos, indica que, em média diária, dentro do tanque, um átomo de cloro deveria ser transformado por um neutrino solar em um átomo de argônio.

Ao deixar passar vários dias, poderá verificar-se que houve formação de vários átomos de argônio. No entanto, o argônio se desintegra depois de uns 35 dias e torna a transformar-se em cloro. Por conseguinte, se, por um período de tempo prolongado, o líquido ficar exposto à corrente dos neutrinos solares, que penetram em tudo, em breve deve estabelecer-se uma espécie de equilíbrio, deve haver formação e desintegração de átomos de argônio, equilibrando-se em média. Lamentavelmente, é muito fraca a concentração de átomos de argônio, efetuada ao longo do processo. Supondo que o nosso modelo do Sol esteja certo, no tanque deveriam concentrar-se tão somente uns 35 átomos de argônio, para serem detectados e contados.

A tarefa de encontrar 35 átomos de argônio em 610 t de líquido supera e em muito a de ir procurar agulha em palheiro. Somente 1 cm^3 contém tantos átomos de cloro que sua contagem daria um número de 22 algarismos, ao passo que no tanque, usado por Davis, havia 390.000 l, ou seja, 390 milhões de tais centímetros cúbicos! E era naquele tanque que deveriam ser procurados 35 átomos de argônio. No entanto, por incrível que pareça, tal tarefa pode ser cumprida. Para tanto, cumpre lavar os átomos de argônio com a ajuda do hélio, a ser passado

pelo líquido. Os testes revelaram que, desta maneira, é possível tirar do tanque 95% de todos os átomos de argônio, lá existentes. Como os átomos de argônio, nascidos dos neutrinos solares, são radioativos, depois de retirados do tanque, podem ser medidos em tubos de contagem, ao se desintegrarem.

Depois de os átomos de argônio terem sido retirados do líquido, lá estão se formando novos átomos de argônio, que, ao cabo de certo tempo, novamente podem ser lavados e contados. Desta maneira, o tanque de percloroetileno representa um detector ilimitado, dentro do qual átomos de argônio, radioativos, não param de se formar.

Em média, espera-se por uma reação diária no tanque. Todavia, as contagens continuadas por anos a fio, revelaram que, em média, acontece uma reação de quatro em quatro dias. Donde podemos concluir que efetivamente está sendo recebida apenas uma quarta parte do suposto total de neutrinos ricos em energia, que seriam emitidos pelo Sol.

Os astrofísicos calcularam e recalcularam seus modelos de estrelas, vez após vez, e Davis sempre tornou a procurar possíveis fontes de erros na sua experiência. No entanto, apesar de tudo, a contradição persistiu. Em que parte estariam falhos os nossos cálculos sobre o Sol? Onde estaria o erro na experiência realizada na mina de ouro?

Seria difícil aceitar que esteja errado tudo quanto se calculou pelo computador. Os modelos do Sol, feitos com os meios eletrônicos de cálculo, estão corretos em muitos pontos; eles conferem com o Sol legítimo, conforme já vimos em outra parte. Efetivamente, mesmo ligeiras correções nos modelos de computador alteram o fluxo dos neutrinos ricos em energia, provenientes do Sol, de modo que nada mais poderia ser alegado contra a experiência. Mesmo uma leve redução da temperatura central do nosso modelo solar já seria o suficiente. Todavia, o ponto nevrálgico da questão está em que não vemos a razão por que a temperatura no centro dos nossos modelos solares deveria estar abaixo da fornecida pelo computador.

Uma saída deste dilema estaria no fato de os neutrinos não poderem viver por muito tempo, indeterminadamente. Aliás, os nossos físicos especialistas em partículas elementares ainda não possuem dados muito explícitos sobre os neutrinos. Se essas partículas, a exemplo de diversas outras, se desintegrassem em outras partículas, ao longo do seu trajeto de oito minutos, do Sol para a Terra, então, não seria nada surpreendente que a contagem da experiência com cloro desses neutrinos em número menor do que se esperava. Contudo, os físicos es-

tão firmemente convictos de que os neutrinos não se desintegram por si sós e, destarte, tal saída fica obstruída.

Pessoalmente, não acredito que haja algo de essencialmente errado com os nossos modelos, fornecidos pelo computador. Por outro lado, seria possível que os índices calculados de reações da cadeia berílio-boro fossem incorretos. O que aconteceria no caso de os dois núcleos de hélio, o hélio normal e o isótopo de hélio, mais leve, posicionados no início da cadeia (fig. 5-6), reagissem um contra o outro, por menos vezes do que os nossos físicos nucleares costumam supor? Nesse caso, o aspecto do nosso Sol seria outro? Não, não seria; pois isto em nada influiria na cadeia próton-próton, geradora de energia solar. Nada estaria diferente no Sol; somente o fluxo de neutrinos ricos em energia ficaria diminuído e isto viria a conferir com a experiência com o cloro. Portanto, não acho que as nossas idéias sobre a composição interna do nosso Sol devam ser revistas, essencialmente, em face da experiência com o cloro.

A Experiência com o Gálio

Ao lado do cloro, há ainda outros átomos que reagem aos neutrinos. Um deles é o isótopo do elemento gálio. Seu número de massa é 71 e, ao receber um neutrino, transforma-se no elemento germânio. A diferença básica entre a experiência com o cloro e a com o gálio está no fato de, em uma experiência com gálio, contarem também os neutrinos não muito ricos em energia. Um detector de gálio registra os neutrinos da cadeia próton-próton, ou seja, os que de fato são liberados com a geração da energia solar e não os neutrinos provenientes de uma reação secundária, sem importância.

Então, por que não fazer logo a experiência com o gálio? O problema está, sobretudo, na tarefa de contar todos os átomos de germânio, formados com a reação dos neutrinos. Para tanto, detectores apropriados ainda estão para ser desenvolvidos. Em segundo lugar, tornam a surgir dificuldades, conforme surge com todas as experiências com neutrinos. É raríssima a vez quando um neutrino é capturado por um núcleo atômico. E para, com todo aquele fluxo de neutrinos solares, provocar a transformação de um átomo de gálio em um átomo de germânio, por dia, é preciso armazenar no tanque 37 t de gálio. Tal quantidade não é nada pequena, em comparação com as reservas globais de gálio puro, existentes em todo o mundo. O gálio é um produto secundário na fabricação do alumínio e, atual-

mente, 1 tonelada de gálio custa 1 milhão de marcos alemães (cerca de 36 milhões de cruzeiros). Evidentemente, para a experiência, o gálio pode ser emprestado e depois devolvido, mas resta saber, se esta seria de fato a maneira mais econômica de obtê-lo para a experiência. Decerto, todas as potências atuais devem dispor de reservas de gálio, para o caso de uma guerra; além disso, a indústria eletrônica necessita do gálio. Logo, deve existir.

Enquanto estou escrevendo estas linhas, cientistas do Instituto Max Planck de Física Nuclear, em Heidelberg, Alemanha Federal, estão trabalhando na elaboração de detectores de germânio; simultaneamente, nos EUA, em Israel e na República Federal da Alemanha, estão sendo conduzidas negociações, para liberar as verbas necessárias a uma experiência preliminar com o gálio. Provavelmente, mais cedo ou mais tarde, será realizada também a grande experiência. Será que confirmará as nossas idéias da composição interna do Sol? Ou ficaremos sabendo nós, os astrofísicos, que tudo quanto julgamos saber a respeito da geração de energia no Sol está errado, sem fundamento?

Quiçá, nesta altura, o leitor estranhará que falamos do Sol atual, mas ignoramos, por completo, algumas das suas propriedades. Nada se mencionou a respeito das *manchas solares*, do seu ciclo de 11 anos, das *protuberâncias* e das *explosões de radiação*, oportunamente citadas pela imprensa escrita e falada. O motivo desta nossa omissão está no fato de termos focalizado tão-somente as propriedades principais do Sol, além das quais há os fenômenos supra, que ocorrem nas camadas externas do Sol. Esses fenômenos representam algo de semelhante com o tempo, produzido pelo estado atmosférico; se for para estudar o passado e o presente geológico da Terra, não é preciso aprofundar-se nos estudos do relâmpago e do trovão.