



## SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



### Os Físicos Brasileiros e os Prêmios Nobel de Física (PNF) de 1972 e 1983.

O PNF de 1972 foi concedido aos físicos norte-americanos John Bardeen (1908-1991; PNF, 1956), Leon Neil Cooper (n.1930) e John Robert Schrieffer (n.1931) pelo desenvolvimento da **Teoria da Supercondutividade**, a hoje famosa **Teoria BCS**. O PNF de 1983, foi outorgado aos astrofísicos, o indiano-norte-americano Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995) e o norte-americano William Albert Fowler (1911-1995) por suas contribuições ao entendimento da estrutura e da evolução das estrelas. Neste verbete, vou destacar os trabalhos de físicos estrangeiros e brasileiros que se relacionaram, diretamente ou indiretamente, com esses Prêmios.

Conforme vimos em verbete desta série, a **supercondutividade** foi descoberta pelo físico holandês Heike Kamerlingh-Onnes (1853-1926; PNF, 1913), em 1911 (*Communications from the Physical Laboratory at the University of Leiden* **1226**, p. 124c), ao observar que, à temperatura do ponto de liquefação do hélio (He), em torno de 4,2 K, a resistência elétrica do mercúrio (Hg) caía bruscamente para  **$10^5 \Omega$  (ohms)**. Logo depois, em 1913 (*Communications from the Physical Laboratory at the University of Leiden, Supplement* **35**), Onnes observou que um material supercondutor voltaria ao seu estado normal, se através dele passasse uma corrente elétrica suficientemente alta. Em 1916, F. S. Silsbee observou que a quebra do estado supercondutor de Hg devia-se ao campo magnético associado à corrente elétrica e não à corrente em si.

Durante muitos anos depois da descoberta de Onnes, acreditou-se que, exceto pelo fato de apresentarem resistência praticamente nula, esses novos materiais, denominados posteriormente de **supercondutores**, possuíam as mesmas propriedades que os condutores normais. Somente em 1933 (*Naturwissenschaften* **21**, p. 787), os físicos alemães Fritz Walther Meissner (1882-1974) e Robert Ochsenfeld (1901-1993) observaram que o estado supercondutor é **diamagnético**. Com efeito, em uma experiência realizada naquele ano, na qual um cilindro longo de estanho (Sn) era resfriado na presença de um campo magnético externo e abaixo de sua temperatura crítica  $T_C$  (temperatura em que ocorre a **supercondutividade**), eles observaram que as linhas de indução do campo magnético externo eram expulsas do interior do cilindro de estanho. Esse resultado, conhecido desde então como **efeito Meissner-Ochsenfeld**, significava que a passagem do estado normal (**paramagnético**) para o estado supercondutor (**diamagnético**) era equivalente a uma transição de fase termodinamicamente reversível. Registre-se que essa transição de fase foi demonstrada, em 1938 (*Physica* **5**, p. 993), pelos físicos holandeses P. H. van Laer (1906-1989) e Willem Hendrik Keesom (1876-1956) ao realizaram uma experiência, na qual mediram as capacidades caloríficas de cilindros de estanho (Sn), nos dois estados: **condutor** e **supercondutor**.

O fenômeno da **supercondutividade**, na década de 1930, foi explicado por duas teorias fenomenológicas: uma **termodinâmica**, desenvolvida pelos físicos holandeses Cornelis Jacobus Gorter (1907-1980) e Hendrik Brugt Gerhard Casimir (1909-2000), em 1934 (*Physica* **1**, p. 306), baseada na hipótese de dois fluidos, segundo a qual a entropia do estado supercondutor é menor do que a entropia do estado normal, significando isso dizer que os elétrons no estado supercondutor são mais ordenados do que no estado normal; e uma outra **eletrodinâmica**, elaborada pelos físicos alemães, os irmãos London, Fritz Wolfgang (1900-1954) e Heinz (1907-1970), em 1935 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A149**, p. 71; *Physica* **2**, p. 341).

Segundo essa teoria dos London, as **Equações de Maxwell** (vide verbete nesta série) seriam alteradas para considerar a hipótese de que o **vetor densidade de corrente** ( $\vec{J}$ ) do estado **supercondutor**, dependeria apenas do **potencial vetor** ( $\vec{A}$ ), isto é:  $\vec{J} = -(c/4\pi\lambda_L)\vec{A}$ , no sistema CGS, sendo  $c$  a velocidade da luz no vácuo. Essa expressão ficou conhecida com o nome de **Equação de London** e o parâmetro  $\lambda_L$  é chamado de **comprimento de penetração de London**, comprimento esse que media a penetração (característica de cada material) do campo magnético na superfície lateral do **supercondutor**. É oportuno observar que a medida desse comprimento era o tema da Tese de Doutorado de Heinz London.

Essas teorias fenomenológicas vistas acima receberam, em 1950 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* **20**, p. 1064), um tratamento quanto-mecânico por parte dos físicos russos Vitaly Lazarevich Ginzburg (n.1916; PNF, 2003) e Lev Davidovich Landau (1908-1968; PNF, 1962), tratamento esse que ficou conhecido como Teoria de Landau-Ginzburg. Registre-se que, em 1987 (*Applied Physics Letters* **51**, p. 1954), M. Barsoum, D. Patten e S. Tyagi utilizaram o **efeito Meissner-Ochsenfeld** para separar, purificar e classificar os polvilhos (pós) **supercondutores**. Ainda em 1950, o físico norte-americano Emanuel Maxwell (1912-2000) (*Physical Review* **78**, p. 477) e, independentemente, C. A. Reynolds, B. Serin, W. H. Wright e L. B. Nesbitt (*Physical Review* **78**, p. 487) descobriram o chamado **efeito isotópico**, segundo o qual a temperatura crítica  $T_C$  dos **supercondutores** variava na razão inversa de uma certa potência da massa isotópica desses materiais. Nesse mesmo ano de 1950, o físico alemão Herbert Fröhlich (1905-1992) (*Physical Review* **79**, p. 845) e, independentemente, Bardeen (*Physical Review* **80**, p. 567), propuseram uma teoria para explicar aquele efeito. Eles afirmavam que o estado **supercondutor** era devido à interação entre os elétrons e a vibração (**fônon**) dos átomos no cristal, interação essa mais tarde conhecida como **interação elétron-fônon** que, em linhas gerais, significava que um elétron, ao deslocar-se em uma rede cristalina formada de íons positivos, era atraído por estes, provocando uma vibração local da rede. Registre-se que esse resultado teórico foi confirmado experimentalmente, por Reynolds, Serin e Nesbitt, trabalhando com isótopos de mercúrio (Hg), em 1951 (*Physical Review* **84**, p. 691).

Em 1952 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A215**, p. 291), Fröhlich apresentou a idéia de que a **interação elétron-fônon** produzia uma atração entre elétrons, e que em muitos metais essa atração era ligeiramente superior à repulsão Coulombiana eletrônica. Observou, também, que essa atração produzia um “gap” de energia entre o estado fundamental e o primeiro estado excitado de um material no estado **supercondutor**. Esse “gap” (da ordem de  $k T_C$ ) foi encontrado, em 1953 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A66**, p. 217), em uma experiência realizada por B. B. Goodman ao estudar a condutividade térmica daquele tipo de material. Registre-se que, mais tarde, em 1956, W. S. Corak, Goodman, C. B. Satterthwaite e A. Wexler (*Physical Review* **102**, p. 656) e, independentemente, Corak e Satterthwaite (*Physical Review* **102**, p. 662), confirmaram a mesma observação de Goodman, de 1953, desta vez envolvendo o calor específico daquele tipo de material.

A partir da observação do “gap” acima referido, várias teorias foram então formuladas para poder explicá-lo. Em 1955 (*Physical Review* **99**, p. 1140), Bardeen e o físico norte-americano David Pines (n.1924) mostraram que esse “gap” era devido ao fato de que a **interação elétron-fônon** de Fröhlich-Bardeen produzia uma atração entre elétrons ligeiramente maior do que a repulsão Coulombiana entre estes, confirmando, desse modo, o que Fröhlich havia proposto em 1952. No ano seguinte, em 1956 (*Physical Review* **104**, p. 1189), Cooper usou ainda aquela interação para explicar o “gap”, porém, com uma nova interpretação. Com efeito, segundo Cooper, um elétron passando nas proximidades de um íon positivo de um cristal **supercondutor** interage com o mesmo, havendo, portanto, conforme dissemos anteriormente, a vibração da rede cristalina e a conseqüente emissão de um fônon. Contudo, se um segundo elétron passa, subseqüentemente, pelo mesmo íon, ele absorverá esse fônon, trocarão momentos, e os dois elétrons caminharão juntos no menor estado de energia possível, constituindo o que ficou conhecido desde então como o **par de Cooper**. Desse modo, no entender de Cooper, o “gap” seria a energia necessária para romper esse par. Note-se que, como esse **par** é formado de elétrons, que são **férmions** (vide

verbete nesta série), porém com seus spins de valor  $\frac{1}{2}$ , em sentidos contrários, o spin resultante desse **par** é nulo e, portanto, ele passa a se comportar como um **bóson** (ver verbete nesta série). Em virtude disso, se diz que, na formação desse **par**, há uma “bosonificação” de **férmions**. Em 1957 (*Physical Review* **107**, p. 354), o físico brasileiro Newton Bernardes (1931-2007) apresentou uma nova interpretação para o “gap” referido acima, usando, para isso, o modelo de dois fluidos de Gorter-Casimir, visto anteriormente. Com efeito, com o objetivo de explicar esse “gap”, Bernardes usou uma aproximação de um elétron naquele modelo, aproximação essa que havia desenvolvido enquanto fazia sua Tese de Mestrado, na *Universidade de Illinois*, em Urbana (USA), sob a orientação de Bardeen, em 1955-1956. Nesse seu trabalho, Bernardes calculou o “gap” como sendo da ordem de  $3 k T_C$  no zero absoluto (0 K), o qual vai decrescendo com a temperatura até anular-se em  $T_C$ . Além do mais, ele encontrou uma curva do tipo exponencial para o calor específico eletrônico, que já havia sido obtida por Ginsburg, em 1952-1953 (*Uspekhi Fizika Nauk* **48**, p. 25; *Fortschritte der Physik* **1**, p. 101). Porém, diferentemente de Cooper, para Bernardes o “gap” era devido à excitação de uma “quase-partícula”.

Com relação a esse trabalho de Bernardes, é oportuno registrar que quando ele deixou a *Universidade de Illinois*, para trabalhar na *Universidade de Washington*, no final de 1956, ele continuou mantendo correspondência com Bardeen e com Schrieffer, então aluno de Doutorado de Bardeen, sobre a **supercondutividade**. Em duas cartas dessa correspondência, uma de Schrieffer (12/02/1957) e outra de Bardeen (20/02/1957), eles falaram da importância do modelo de Bernardes, bem como falaram também, e entusiasticamente, sobre a Teoria Microscópica da Supercondutividade (ver mais adiante) que os dois, juntamente com Cooper, estavam criando. Em sua carta, Bardeen sugere que Bernardes publique seu modelo na *Physical Review*, o que de fato aconteceu, conforme vimos acima. [Agradeço ao físico e químico brasileiro Ricardo de Carvalho Ferreira (n.1928), o acesso a essas duas cartas.]

As Teorias Fenomenológicas da Supercondutividade tratadas acima, indicavam que havia necessidade do desenvolvimento de uma **Teoria Microscópica da Supercondutividade**, uma vez que naquelas teorias ficava evidente que o fenômeno da **supercondutividade** se devia, de algum modo, à **interação elétron-fônon**. Desse modo, em 1957 (*Physical Review* **108**, p. 1175; registre-se que, neste artigo, há a citação do artigo de Bernardes), Bardeen, Cooper e Schrieffer desenvolveram a hoje célebre **teoria BCS**, segundo a qual o estado **supercondutor** deve-se, essencialmente, a uma condensação de elétrons em **pares de Cooper** de momento linear comum e sendo representada por uma função de onda coerente única. Essa teoria teve um imediato sucesso pois, além de explicar todos os fatos experimentais conhecidos sobre o estado **supercondutor** as suas previsões quantitativas foram rapidamente confirmadas. Por exemplo, segundo essa teoria, o “gap” do estanho (Sn) vale  $3.7 k T_C$ . É oportuno destacar que, em 1958 (*Journal of Experimental and Theoretical Physics, Soviet Physics* **7**, p. 41), o físico russo Nikolai Nikolaevich Bogoliubov (1900-1992) desenvolveu uma teoria análoga à **teoria BCS**.

Registre-se que a teoria BCS apresentou algumas dificuldades para explicar as **cerâmicas supercondutores**, descobertas em 1986 (*Zeitschrift für Physik* B64, p. 189), pelos físicos, o alemão Johannes Georg Bednorz (n.1950; PNF, 1987) e o suíço Karl Alex Müller (n.1927; PNF, 1987), assim como explicar as experiências relacionadas com algumas propriedades de tais cerâmicas, como as descritas pelo físico brasileiro Eugênio Lerner (1944-1999), em 1987 [*Ciência Hoje* 6(33), p. 10]. Para contornar aquelas dificuldades, ainda em 1987, algumas teorias foram desenvolvidas, como, por exemplo: a do **bipolaron** [lembrar que o **polaron** é descrito como um elétron ou uma “lacuna” (“buraco”) positiva(o) em um semicondutor que distorce a “rede” (“lattice”) em torno dele], formulado pelo físico inglês Sir Nevill Francis Mott (1905-1996; PNF, 1977) (*Nature* 327; p. 185); e a da **ligação de valência ressonante** (“resonating valence bond” – RVB), desenvolvida pelo físico norte-americano Philip Warren Anderson (n.1923; PNF, 1977) (*Science* 235, p. 1196). Destaque-se que o físico brasileiro Luiz Carlos Lobato Botelho (n.1960), em 1990 (*Physical Review* D41, p. 3283), propôs uma teoria analítica de “cordas quânticas” (sobre cordas, ver verbete nesta série) para as superfícies orbitais Andersonianas, teoria essa potencialmente capaz de explicar a **supercondutividade à temperatura finita**.

Agora, vejamos o PNF de 1983 que se relaciona com a estrutura e a evolução das estrelas, conforme destacamos no início deste verbete. Um dos primeiros estudos sobre a evolução estelar foi apresentado pelo astrônomo inglês Sir Joseph Norman Lockyer (1836-1920) – o descobridor do hélio (He) (nome cunhado por ele) no Sol, em 1868 [também descoberto, independentemente, nesse mesmo ano, pelo astrônomo francês Pierre Jules César Jansenn (1824-1907)], e o fundador da Revista *Nature*, em 1869. Nesse estudo, realizado em 1887 (*Proceedings of the Royal Society of London* **43**, p. 117), Lockyer afirmou que uma estrela ao se contrair, o calor aumenta e a mesma passa a emitir radiação até atingir um determinado tamanho, a partir daí ela começa a esfriar até se apagar. Em 1895 (*Memoirs of the Royal Astronomical Society* **51**, p. 123), o astrônomo irlandês Ralph Allen Sampson (1866-1939) apresentou a idéia de que o processo de transmissão de energia por parte de uma estrela era provocado pelo mecanismo de radiação e não de convecção, como se acreditava. Essa idéia foi desenvolvida, em 1902 (*Astrophysical Journal* **16**, p. 320) e 1905 (*Astrophysical Journal* **21**, p. 1), pelo físico alemão Arthur Schuster (1851-1934), e em 1906 (*Akademie der Wissenschaften zu Göttingen Nachrichten, Mathematisch-Physikalische Klasse* **1906**, p. 41), pelo astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916).

Novos aspectos da evolução estelar foram discutidos no decorrer das primeiras décadas do Século 20. Com efeito, logo em 1902 (*Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **190**, p. 1), o físico, matemático e astrônomo inglês Sir James Hopwood Jeans (1877-1946), formulou o hoje famoso **critério de Jeans** para o colapso gravitacional estelar, segundo o qual a força de gravitação excederia à força decorrente do gradiente de pressão gasosa dentro de uma nuvem estelar. Mais tarde, em 1907, o astrofísico suíço Robert Emden (1862-1940), no livro intitulado **Gaskugeln, Anwendungen der mechanischen Wärme-theorie auf kosmologische und meteorologische Probleme**, publicado em Leipzig, apresentou um outro modelo da evolução estelar, qual seja, o de que esta é devida à contração de uma esfera de gás perfeito (vide verbete nesta série), ocasião em que introduziu o conceito de “mudança politrópica de estado”. Ainda nesse livro, Emden foi o primeiro a deduzir o equilíbrio radioativo de partículas indistinguíveis.

Por sua vez, o astrônomo inglês Sir Arthur Eddington (1882-1944) desenvolveu outras idéias para o entendimento da dinâmica estelar, idéias essas decorrentes de temas tratados no livro que escreveu, em 1914, sob o título **Stellar Movements and the Structure of the Universe** (Cambridge University Press), no qual apresentou uma verdadeira súpula de todo o conhecimento existente sobre a distribuição e dinâmica das estrelas nos diversos tipos de nebulosas. Logo depois, em 1915 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **76**, p. 525), ele estimou a massa total (M) de um aglomerado (“clusters”) de estrelas em equilíbrio estatístico, como sendo dada por:  $M \approx 2R_{cl} \langle v^2 \rangle / G$ , onde  $R_{cl}$  é um adequado raio que depende da distribuição de massa do aglomerado,  $\langle v^2 \rangle$  é a velocidade média quadrática das estrelas nesse aglomerado, e G é a **constante de gravitação universal de Cavendish-Newton**. Em 1916 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **77**, p. 16), Eddington apresentou a idéia de que o equilíbrio estelar deve-se ao balanço entre a atração gravitacional e as pressões: gasosa e de radiação. Já em 1920 (*Observatory* **43**, p. 353), em uma Reunião da *Sociedade Britânica para o Progresso da Ciência*, Eddington propôs que o mecanismo de geração de energia das estrelas decorria da conversão (fusão) de quatro átomos de hidrogênio (H) em um núcleo de hélio (He). Ainda nessa Reunião, ele afirmou que, devido a essa conversão, a estrela (principalmente a **anã-branca**) perde energia e contrai-se provocando um aumento de temperatura e, conseqüentemente, esse tipo de estrela radiaria intensamente de acordo com a teoria clássica da relação entre energia térmica (E) e temperatura absoluta (T), qual seja:  $E \propto kT$ , onde k é a **constante de Boltzmann**.

Ainda em 1920 (*Philosophical Magazine* **40**, p. 479), o astrofísico indiano Megh Nad Saha (1894-1956) deduziu uma fórmula na qual mostrou que o grau de ionização da matéria estelar (gás muito quente) era expresso em termos de sua temperatura e da pressão dos elétrons, fórmula essa que ficou conhecida como a famosa **equação de Saha**. Por outro lado, também em 1920 (*Astrophysical Journal* **52**, p. 23), os astrônomos holandeses Jacobu Cornelius Kapteyn (1851-1922) e Pieter Johannes van Rhijn (1886-1960) mostraram que a distribuição da luminosidade das estrelas poderia ser aproximada por uma Função Gaussiana.

Em 1924 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **84**, p. 308), Eddington retomou a idéia que tivera, em 1916, sobre o equilíbrio estelar e mostrou que nas **anãs-brancas** o campo gravitacional é tão forte que produz uma grande contração, reduzindo-lhe o tamanho e, em consequência disso, os átomos perdem a maioria de seus elétrons, restando um gás altamente ionizado formando assim um estado de **matéria degenerada**, com uma densidade média de  $10^8$  kg/m<sup>3</sup>. Nesse trabalho, Eddington calculou com sendo da ordem de 20 km/s o desvio para o vermelho do comprimento de onda de um raio luminoso emitido por uma estrela desse tipo. Contudo, esse modelo de Eddington apresentava uma grande dificuldade, pois a relação massa  $\times$  luminosidade por ele utilizada indicava que, por apresentar uma alta temperatura, uma **anã-branca** deveria irradiar intensamente de acordo com a relação entre energia térmica e temperatura vista acima. Isso, no entanto, não era observado. Essa dificuldade foi contornada pelo matemático inglês Sir Ralph Howard Fowler (1889-1944), em 1926 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **87**, p. 114), ao mostrar que naquele tipo de estrela, no processo de converter H em He, ela perde energia e contrai-se até que a pressão interna ( $p$ ) torna-se tão grande, o bastante para causar o colapso de sua estrutura atômica, configurando um estado de **matéria degenerada** formada apenas de elétrons. Desse modo, usando a **estatística de Fermi-Dirac**, de 1926 (vide verbete nesta série), Fowler demonstrou que o puxão gravitacional ocorrido na estrela é equilibrado pela repulsão dos elétrons “degenerados”, repulsão essa decorrente do **princípio da exclusão de Pauli**, de 1925 (vide verbete nesta série). Desse modo, para essa matéria “degenerada”, Fowler encontrou a seguinte relação entre  $p$  e a densidade ( $\rho$ ):  $p \propto \rho^{5/3}$ , e que essa Equação de Estado independe de  $T$ . Registre-se que foi ainda em 1926, que Eddington publicou seu livro **The Internal Constitutions of the Stars** (Cambridge University Press), no qual apresenta suas pesquisas sobre a evolução estelar, iniciadas em 1914. Esse modelo de Eddington-Fowler foi modificado por Chandrasekhar. Vejamos como.

Depois de obter o Bacharelado em Física no *Presidence College*, em Madras, na Índia, em junho de 1930, Chandrasekhar [sobrinho do famoso físico indiano Sir Chandrasekhara Venkata Raman (1888-1970; PNF, 1930)] foi, em julho de 1930, para a *Universidade de Cambridge* estudar as **anãs-brancas** (cujo interesse sobre as mesmas ocorreu-lhe em 1929), com Eddington e Fowler. Assim, entre 1931 e 1932 [*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **91**, p. 456 (1931); *Philosophical Magazine* **11**, p. 592 (1931); *Astrophysical Journal* **74**, p. 81 (1931); e *Zeitschrift für Astrophysik* **5**, p. 321 (1932)], Chandrasekhar desenvolveu um novo modelo para a **anã-branca** levando em conta os efeitos relativísticos na Equação de Estado do gás de elétrons “degenerados”. Para desenvolver esse modelo, ele percebeu que havia um limite para a repulsão Pauliana entre aqueles elétrons, pois a Relatividade Restrita Einsteiniana (vide verbete nesta série) determinava uma diferença máxima nas velocidades dessas partículas. Assim, quando a estrela se torna suficientemente densa, a repulsão eletrônica Pauliana não será capaz de vencer a atração gravitacional. Desse modo, Chandrasekhar descobriu que nenhuma **anã-branca** pode ter massa maior do que  $1,44 M_{\odot}$  ( $M_{\odot} \equiv$  massa do Sol), valor esse que ficou conhecido como **limite de Chandrasekhar**.

Ainda em 1932 (*Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion* **1**, p. 285), o físico russo Lev Davidovich Landau (1908-1968; PNF, 1962) descobriu que havia um outro estado final para uma estrela com a massa  $1 - 2 M_{\odot}$ , porém muito menor do que a **anã-branca** e cuja atração gravitacional seria equilibrada pela repulsão Pauliana dos constituintes do núcleo atômico (por essa época, o nêutron ainda não havia sido descoberto, o que aconteceu logo depois, conforme vimos em verbete desta série). Em 1934 (*Proceedings of the National Academy of Sciences* **20**, pgs. 254; 259; *Physical Review* **45**, p. 138), os astrofísicos, o alemão Walter Baade (1893-1960) e o búlgaro-suíço-norte-americano Fritz Zwicky (1898-1974) demonstraram que a estrela prevista por Landau era uma estrela constituída somente de nêutrons, conhecida desde então como **estrela de nêutrons** (“nêutron star”), com a massa em torno de  $1 M_{\odot}$ , com raio de cerca de 10 km, e densidade da ordem de  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>. Note-se que, nesse tipo de estrela, a atração gravitacional é equilibrada, basicamente, pela repulsão Pauliana de nêutrons “degenerados”. É oportuno registrar que em

1937, o astrofísico russo-norte-americano George Antonovich Gamow (1904-1968) publicou o livro intitulado **Atomic Nuclei and Nuclear Transformations** (Oxford University Press), no qual demonstrou que um gás de nêutrons poderia ser comprimido até uma alta densidade e, com isso, mostrou que as **estrelas de nêutrons** poderiam atingir a alta densidade de  $10^{17}$  kg/cm<sup>3</sup>. Registre-se, também, que Landau, em 1938 (*Nature* **141**, p. 333), publicou um trabalho no qual afirmou que toda a estrela tem em seu interior um caroço de nêutrons, assim como propôs um novo modelo para a **estrela de nêutrons**, chegando a calcular sua massa em torno de **0,001 M<sub>☉</sub>**.

Depois de se doutorar em Física, em 1933, tendo Sir Fowler como supervisor de sua Tese, Chandrasekhar permaneceu em Cambridge realizando uma série de trabalhos sobre evolução e estrutura estelares [*Observatory* **57**, pgs. 93; 373 (1934); **59**, p. 47 (1936); *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **95**, pgs. 207; 226; 676 (1935); **96**, p. 644 (1936)]. Nessas pesquisas, basicamente, ele mostrou que, quando uma estrela supera o limite de **1,44 M<sub>☉</sub>**, ela poderá transformar-se em uma **estrela de nêutrons** ou em um objeto tão massivo que nem a luz poderá escapar dela. Note-se que, em 1939 (*Physical Review* **56**, p. 455), os físicos norte-americanos Julius Robert Oppenheimer (1904-1967) e Hartland Snyder (1913-1962) apresentaram a idéia de que o objeto tão massivo proposto por Chandrasekhar seria resultante de um colapso estelar devido à contração gravitacional. Tal objeto foi denominado de **buraco negro** pelo físico norte-americano John Archibald Wheeler (1911-2008), em 1967 (vide verbete nesta série).

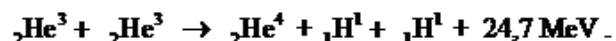
Em 1936, Chandrasekhar recebeu um convite do astrônomo russo-norte-americano Otto Struve (1897-1963) para ser Pesquisador Associado do *Yerkes Laboratory* da *Universidade de Chicago*, a partir de janeiro de 1937. Nessa Universidade, na qual trabalhou até a sua morte em 1995, ele realizou uma série de pesquisas sobre Astrofísica, dentre elas, o trabalho que fez com o físico brasileiro Mário Schenberg (1914-1990), em 1942 (*Astrophysical Journal* **96**, p. 161). Nesse trabalho, eles apresentaram uma análise da evolução do Sol e de estrelas semelhantes que compõem a chamada **seqüência principal do diagrama de Hertzsprung-Russell** (vide verbete nesta série). Nessa análise, na qual há um estudo da luminosidade desse tipo de estrela em função de sua massa, basicamente, foi verificado o que acontecia quando fosse queimado todo hidrogênio (H) do centro dessas estrelas. Ainda nesse trabalho eles mostraram que não existe estrela estável na qual o caroço de hélio (He) contém mais de 10% da massa da estrela. Esse resultado, conhecido como limite de Schenberg-Chandrasekhar, explica a formação de estrelas **gigantes-vermelhas** durante o curso da evolução estelar. [Malcolm S. Longair, *IN: Twentieth Century Physics, Volume III* (Institute of Physics Publishing and American Institute of Physics Press, 1995).]

Na *Universidade de Chicago*, Chandrasekhar realizou uma série de pesquisas em evolução estelar (ver a relação e alguns detalhes desses trabalhos, em sua *Lecture Nobel*), envolvendo diversos temas (p.e: Astrofísica Relativística, Dinâmica Browniana estelar, transferência de radiação estelar, estabilidade hidromagnética e hidrodinâmica estelar, buracos negros etc.), que foram reunidos nos seguintes livros: **Introduction to the Study of Stellar Structure** (Chicago University Press, 1939); **Principles of Stellar Dynamics** (Chicago University Press, 1943); **Radiative Transfer** (Clarendon Press, 1950); **Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability** (Clarendon Press, 1961); **Ellipsoidal Figures of Equilibrium** (Yale University Press, 1968); e **The Mathematical Theory of Black Holes** (Clarendon Press, 1983). Observe-se que Chandrasekhar foi Editor do *Astrophysical Journal*, de 1952 até 1971, e publicou dois outros livros fora de sua atividade principal de pesquisa: **Truth and Beauty: Aesthetics and Motivations in Science** (Chicago University Press, 1987) e **Newtons's Principia for the Common Reader** (Clarendon Press, 1995).

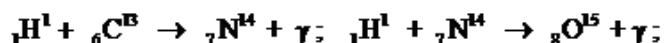
Visto o trabalho de Chandrasekhar que o levou ao *Prêmio Nobel*, vejamos os trabalhos de William Fowler (que não era parente de Sir Fowler) sobre as **reações termonucleares** responsáveis pela energia das estrelas, que fizeram-no compartilhar esse Prêmio com Chandrasekhar. Em 1929 (*Zeitschrift für Physik* **54**, p. 656), o astrofísico inglês Robert d'Escourt Atkinson (1898-1982) e o físico austríaco Fritz Georg Houtermans (1903-1966) apresentaram a idéia de que a produção de energia nas estrelas decorria do **efeito túnel** (1928) (vide verbete nesta série), pois tal mecanismo permitia que, em altas temperaturas (como ocorre no interior das estrelas), núcleos de elementos

químicos seriam forçados a se juntar e, conseqüentemente, **reações termonucleares** ocorreriam espontaneamente, gerando aquela energia. Mais tarde, em 1936 (*Astrophysical Journal* **84**, p. 73), Atkinson propôs que uma das reações mais comuns no interior de estrelas seria a que juntava dois prótons ( ${}_1\text{H}^1 \equiv \text{p}$ ), produzindo o dêuteron ( ${}_1\text{D}^2$ ), com a emissão de um pósitron ( $\text{e}^+$ ). Essa idéia foi também defendido pelo físico alemão Barão Carl Friedrich von Weizsäcker (1912-2007), em 1937 (*Physikalische Zeitschrift* **38**, p. 176).

Logo depois, em 1938 (*Physical Review* **54**, p. 248), os físicos, o germano norte-americano Hans Albrecht Bethe (1906-2005; PNF, 1967) e o norte-americano Charles Louis Critchfield (1910-1994) apresentaram o famoso **ciclo próton-próton** como gerador de energia das estrelas tão (ou menos) massivas quanto o Sol, obedecendo a uma reação termonuclear do tipo (em notação atual):



Ainda em 1938 (*Physikalische Zeitschrift* **39**, p. 633), Weizsäcker propôs o igualmente famoso **ciclo carbono-nitrogênio-oxigênio-carbono** como gerador de energia das estrelas mais massivas do que o Sol, ciclo esse confirmado por Bethe, em 1939 (*Physical Review* **55**, p. 434), e com a seguinte reação termonuclear (em notação atual):



A partir da década de 1940, apareceram as primeiras teorias sobre a formação dos elementos químicos no Universo, a **nucleossíntese**, para a qual William Fowler contribuiu. Logo em 1942 (*Astrophysical Journal* **95**, p. 288), Chandrasekhar e L. R. Henrick apresentaram os primeiros cálculos sobre a formação dos elementos químicos nas estrelas. Assim, nesse trabalho, eles mostraram que se esses elementos estão em equilíbrio em alta temperatura, conforme se acreditava, suas abundâncias são inversamente correlacionadas com suas energias de ligação. Contudo, eles observaram que esse equilíbrio só era satisfeito para densidades em torno de  $10^9 \text{ kg/m}^3$  e em temperaturas da ordem de  $10^{10} \text{ K}$ . Eles também perceberam que, enquanto os elementos leves eram produzidos com abundância, o mesmo não acontecia com os elementos pesados, com  $Z > 70$ . Para essa **catástrofe do elemento pesado**, eles sugeriram que a mesma decorria de algum processo de não-equilíbrio. Essa dificuldade começou a ser contornada com os trabalhos desenvolvidos por Gamow e seus colaboradores, conforme veremos a seguir. É oportuno registrar que, conforme vimos em verbete desta série, Gamow e Schenberg, em 1941, haviam formulado o famoso **efeito Urca**, um processo físico que explicava o colapso estelar. Conforme vimos em verbete desta série, partindo da idéia da explosão inicial do Universo, apoiando-se na equação de Einstein e nas Leis da Termodinâmica, Gamow passou a elaborar o seu modelo da **nucleossíntese**. Assim, em 1946 (*Physical Review* **70**, p. 572), considerou que nos primeiros momentos, o Universo era bastante denso e muito quente, ocasionando rápidas reações termonucleares. Em 1948 (*Physical Review* **73**, p. 803), em colaboração com seu aluno, o físico norte-americano Ralph Asher Alpher (1921-2007), Gamow apresentou o seu famoso artigo no qual o “ovo cósmico” [proposto pelo astrônomo belga, o abade Georges Edouard Lemaître (1894-1966), em 1927] formado de nêutrons, no instante do *big bang* [nome cunhado, pejorativamente, pelo astrofísico inglês Sir Fred Hoyle (1915-2001), em 1950 (vide verbete nesta série)], se desintegrou

em prótons e elétrons. Ao serem formados esses prótons, alguns colidiram com nêutrons que ainda persistiam e, gradualmente, iam formando núcleos mais pesados da Tabela Periódica, num processo que ficou conhecido como nucleossíntese. É oportuno destacar que esse artigo também ficou famoso pelo senso de humor de Gamow, ao persuadir Bethe para também assiná-lo, com o objetivo de formar as três primeiras letras do alfabeto grego [alfa ( $\alpha$ ) (Alpher), beta ( $\beta$ ) (Bethe) e gama ( $\gamma$ ) (Gamow)], que combinavam bem com o propósito do artigo que era o de descrever o início do Universo. Em vista disso, o modelo desenvolvido nesse artigo ficou conhecido como *modelo cosmológico  $\alpha\beta\gamma$* , modelo no qual continha a notável previsão de que a radiação (sob a forma de fótons) do início do *big bang* ainda deveria estar presente, com a única diferença que a temperatura inicial do Universo, agora, deveria apresentar um valor extremamente baixo, cerca de 25 K. (Ver mais detalhes desse modelo assim como a determinação dessa temperatura inicial nos verbetes desta série referidos acima.)

No entanto, esse modelo (teoria) da **nucleossíntese** apresentava uma grande dificuldade, qual seja, a explicação de como o hélio ( ${}^2\text{He}^4$ ) se convertera nos outros elementos químicos pesados nos momentos iniciais do *big bang*. Na elaboração desse modelo, Gamow e seus colaboradores [inicialmente Alpher e, posteriormente, o físico norte-americano Robert C. Herman (1914-1997); estes, inclusive, realizando trabalhos sem a participação de Gamow (vide verbete nesta série)], mostraram que o acréscimo do núcleo do hidrogênio ( ${}^1\text{H}^1$ ) ao núcleo do  ${}^2\text{He}^4$  produziria o instável núcleo do lítio ( ${}^3\text{Li}^5$ ); a união de dois núcleos do  ${}^2\text{He}^4$  criaria um núcleo instável de berílio ( ${}^4\text{Be}^8$ ). A mesma dificuldade acontecia para criar um núcleo estável de carbono ( ${}^6\text{C}^{12}$ ) a partir da união do  ${}^2\text{He}^4$  com o  ${}^4\text{Be}^8$ . Além do mais, suas previsões apresentavam resultados contraditórios com relação à idade do Universo (vide verbete nesta série).

A dificuldade da **nucleossíntese** foi resolvida por Hoyle, com a contribuição de William Fowler. Vejamos como. Fowler graduou-se em *Engenharia Física* pela *Universidade do Estado em Ohio*, em 1933. Em 1936, doutorou-se no *California Institute of Technology* (CALTECH) sob a orientação do físico dinamarquês-norte-americano Charles Christian Lauritsen (1892-1968), que trabalhava no *W. W. Kellogg Radiation Laboratory* desse Instituto. Nesse Laboratório, em 1939 (*Physical Review* **55**, p. 131), Hans H. Staub e Walter E. Stephens haviam observado que o hélio-5 ( ${}^2\text{He}^5$ ) não era estável. Em 1948 (*Physical Review* **73**, p. 806), A. Hemmendinger fez uma observação análoga para o berílio-8 ( ${}^4\text{Be}^8$ ), que foi confirmada, em 1949 (*Physical Review* **76**, p. 428) por Alvin V. Tollestrup, Fowler e Lauritsen, no *Kellogg*. Esses resultados indicavam que a ausência de núcleos estáveis, com  $A = 5$  e  $A = 8$ , respectivamente, colocava em dificuldades a teoria da **nucleossíntese**, uma vez que tal ausência indicava que os elementos mais pesados do que o  ${}^2\text{He}^4$  (partícula  $\alpha$ ) não poderiam ser formados no *big bang*. Por outro lado, antes, em 1946 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **106**, p. 525; *Astrophysical Journal Supplement* **1**, p. 121), Hoyle sugerira que o  ${}^6\text{C}^{12}$  nas estrelas *gigantes-vermelhas* poderia ser formado pela fusão (reação termonuclear) de três núcleos do  ${}^2\text{He}^4$ , sugestão essa confirmada, em 1951 (*Proceedings of the Royal Irish Academy* **54**, p. 49), pelo astrofísico estoniano Ernst Julius Öpik (1893-1985) que, no entanto, acreditava que a secção de choque para aquela fusão seria muito pequena.

No verão de 1951, o físico austro-norte-americano Edwin Ernst Salpeter (n.1924), da *Universidade de Cornell*, no leste norte-americano, foi trabalhar no *Kellogg*, ocasião em que calculou o efeito de ressonância do espalhamento  $\alpha - \alpha$ , confirmando a previsão de Öpik, conforme anunciou em trabalhos publicados em 1952 (*Astrophysical Journal* **115**, p. 326; *Physical Review* **88**, p. 547). Em 1953 (*Astrophysical Journal Supplement* **1**, p. 121), Hoyle contornou a dificuldade apontada por Öpik e Salpeter ao demonstrar que estados excitados (ressonâncias) do  ${}^6\text{C}^{12}$  (7,65 MeV acima do estado normal) teriam sua secção de choque aumentada e, por isso, esse isótopo do carbono poderia ser formado por intermédio de uma reação termonuclear entre o  ${}^2\text{He}^4$  e o  ${}^4\text{Be}^8$ . Note-se que, para essa conjectura, Hoyle usou o que hoje é conhecido como *princípio antrópico*: *Vemos o*



*Universo do jeito que ele é porque existimos.*

Assim, em vista dessa conjectura e ao visitar o *Kellogg*, ainda em 1953, Hoyle induziu Ward Whaling a realizar uma experiência que confirmasse o processo de fusão no interior das estrelas *gigantes-vermelhas* que acabara de propor. Assim, também em 1953 (*Physical Review* 92, p. 649), Whaling, com a colaboração de D. N. F. Dunbar, R. E. Pixley e W. A. Wenzel anunciaram que haviam encontrado o estado ressonante do  ${}^6\text{C}^{12}$  previsto teoricamente por Hoyle.

Essa descoberta convenceu Fowler a ir trabalhar com Hoyle na *Universidade de Cambridge*, na Inglaterra, em seu ano sabático de 1954-1955. Lá, Fowler e Hoyle reuniram-se com os astrofísicos ingleses, Eleanor Margaret Burbidge (n.1922) e Geoffrey Ronald Burbidge (n.1925) e juntos começaram a desenvolver uma nova teoria sobre a *evolução estelar*. Em 1956, os Burbidge e Hoyle foram ao *Kellogg* e, juntamente com Fowler, completaram aquela teoria e apresentaram-na no famoso trabalho conhecido como  $\text{B}^2\text{FH}$ , intitulado *Synthesis of the Elements in Stars*, publicado em 1957 (*Science* 124, p. 611). Destaque-se que, também em 1957 (*Publications of the Astronomical Society of Pacific* 69, p. 201), o astrofísico norte-americano Alastair Graham Walter Cameron (1925-2005), desenvolveu idéias análogas a essas de Hoyle, Fowler e os Burbidge (n.1925). Segundo essa teoria, os elementos químicos são progressivamente sintetizados a partir dos mais leves até os mais pesados, por intermédio de reações termonucleares.

Logo depois, em 1958, Fowler (*Annual of Review of Nuclear Science* 8, p. 299) e Cameron (*Astrophysical Journal* 127, p. 551), em trabalhos independentes, apresentaram a hipótese de que o processo de geração de energia nas estrelas do tipo do Sol deve-se a uma reação termonuclear do tipo:



A partir de 1960 e durante essa década, Fowler realizou uma série de trabalhos (ver a lista completa, assim como alguns detalhes desses trabalhos, em sua *Nobel Lecture*), nos quais continuou a trabalhar com a teoria da evolução estelar e, também, em *Astrofísica Relativística*, além de pesquisar a presença de hélio e de deutério no Universo. Por exemplo, em 1960 (*Annals of Physics* 10, p. 280; *Astrophysical Journal* 132, p. 565), Fowler e Hoyle apresentaram a idéia de que os elementos químicos são progressivamente sintetizados a partir dos mais leves até os mais pesados, por intermédio de reações termonucleares. Nesses trabalhos, chegaram a determinar a relação entre os isótopos do urânio ( ${}_{92}\text{U}^{235}/{}_{92}\text{U}^{238}$ ) ocorrida entre a formação das galáxias e a situação presente. Em 1963 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 125, p. 169; *Nature* 197, p. 533), Fowler e Hoyle propuseram o conceito de estrelas **supernovas** como sendo estrelas supermassivas e, em 1964 (*Astrophysical Journal, Supplement* 9, p. 201), eles sugeriram que essas estrelas poderiam colapsar em virtude de sua enorme massa, emitindo intensas ondas de rádio. Afirmaram, também, que os **quasares** (descobertos em 1948) seriam versões dessas superestrelas que teriam atingido o fim de suas vidas. Ainda em 1964 (*Astrophysical Journal* 139, p. 909), Fowler, Hoyle e os Burbidge estudaram a *Astrofísica Relativística*. Em 1965, Fowler e Hoyle publicaram o livro intitulado **Nucleosynthesis in Massive Stars and Supernovae** (Chicago University Press). Com Hoyle e Robert Vernon Wagoner, Fowler confirmou, em 1967 (*Astrophysical Journal* 148, p. 3), a criação de 25% de hélio na nucleossíntese primordial por ocasião do **big bang**. Ainda em 1967 (*Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 5, p. 525), Fowler, G. R. Caughlan e B. A. Zimermann investigaram as reações termonucleares envolvendo carbono-12 e hidrogênio, no interior das estrelas. Registre-se que, ainda na década de 1960, Fowler realizou pesquisas isoladamente. Assim, em 1964 (*Reviews of Modern Physics* 36, p. 545), estudou as estrelas massivas e a radiação gravitacional por elas emanadas; em 1966 (*Astrophysical Journal* 144, p. 180), analisou a estabilidade das estrelas supermassivas; e em 1970 (*Comments on Astrophysics and Space Physics* 2, p. 134), Fowler investigou a presença de hélio no Universo. Na conclusão deste verbete, certamente o leitor perguntará a razão pela qual Hoyle, que também realizou trabalhos importantes sobre a evolução estelar, alguns deles com o próprio Fowler, não

compartilhou o PNF de 1983 com Fowler. A resposta foi dada pelo físico indiano-inglês Simon Singh (n.1964), no livro intitulado Big Bang (Record, 2006), no qual afirmou que, uma possível razão para o *Comitê Nobel* haver esnobado Hoyle, deve-se ao fato de que este sempre se mostrou muito franco em suas atitudes, e não colocava o decoro acima da honestidade e da integridade. Uma dessas atitudes aconteceu quando o PNF de 1974 foi atribuído ao astrônomo inglês Martin Ryle (1918-1984), pela descoberta dos quasares (1948) e ao também astrônomo inglês Antony Hewish (n.1924), pela descoberta dos pulsares (1967). Ele reclamou com veemência a ausência do nome da astrônoma irlandesa Susan Jocelyn Bell Burnell (n.1943), então colaboradora de Hewish na *Universidade de Cambridge*, na Inglaterra, por haver sido ela a primeira a observar, em agosto de 1967, o primeiro pulsar na *Nebulosa de Caranguejo*.

---



**ANTERIOR**

**SEGUINTE**