



# CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo  
[www.bassalo.com.br](http://www.bassalo.com.br)



## O Núcleo Atômico, seus Modelos e os Prêmios Nobel de Física (PNF) de 1963 e de 1975.

O PNF de 1963 foi concedido aos físicos, o húngaro-norte-americano Eugene Paul Wigner (1902-1995) e os alemães Maria Goeppert-Mayer (1906-1972) e Johannes Hans Daniel Jensen (1907-1973). Wigner foi laureado Nobel por suas contribuições ao entendimento do núcleo atômico [descoberto pelo físico neozelandês-inglês Lord Ernest Rutherford (1871-1937; PNQ, 1908), em 1911] e das partículas elementares, especialmente pela descoberta de *princípios de simetria* e sua aplicação às leis da Física. Goeppert-Mayer e Jensen receberam o PNF63 pelo modelo nuclear em camadas. Por sua vez, o PNF de 1975 foi distribuído aos físicos, os dinamarqueses Aage Niels Bohr (1922-2009) [filho de Niels Henrik David Bohr (1885-1962; PNF, 1022)] e Ben Roy Mottelson (n.1926) (de origem norte-americana), e o norte-americano Leo James Rainwater (1917-1986) pelos trabalhos sobre a *estrutura interna do núcleo atômico (modelo coletivo)*.

Segundo vimos em verbete desta série, o estudo dos *princípios de simetria* e a aplicação da Teoria de Grupos [inventada pelo matemático francês Évariste Galois (1811-1832), em 1831] aos sistemas de muitos-elétrons foi iniciado por Wigner, em 1926 (*Zeitschrift für Physik* 40, p. 492). Com esse estudo, ele esclareceu a afirmação (*são as assimetrias que possibilitam os fenômenos*) dita pelo físico e químico francês Pierre Curie (1859-1906; PNF, 1903), observando que a descrição de um fenômeno físico depende de suas condições iniciais. Desse modo, é a assimetria das condições iniciais que permite determinar as simetrias das leis da Natureza. A separação entre as condições iniciais e as leis da Natureza surge, naturalmente, quando se representa um fenômeno natural por intermédio de uma equação diferencial, já que, para resolvê-la, é necessário conhecer as condições iniciais. Daí o grande sucesso dos formalismos diferenciais no estudo dos fenômenos físicos.

Por outro lado, ao estudar as Leis de Conservação na Mecânica Quântica, Wigner observou, em 1927 (*Zeitschrift für Physik* 40; 43, p. 883; 624), que tais leis são associadas com a existência do operador unitário P [*operador paridade (reflexão espacial)*], de autovalores  $\pm 1$ , que comutam com o operador hamiltoniano H ( $H = T + V$ , sendo T a *energia cinética* e V a *energia potencial*), isto é:  $PH = HP$ . Em 1929 (*Physikalische Zeitschrift* 30, p. 467) Wigner e o matemático húngaro-norte-americano John von Neumann (1903-1957) estudaram a mudança de níveis de energia em um átomo que sofre uma transição lenta. Registre que Wigner continuou a produzir trabalhos relacionados com a aplicação da Teoria de Grupos na Mecânica Quântica, reunidos por ele em seu célebre livro intitulado *Gruppentheorie und ihre Anwendung auf die Quantenmechanik der Atomspektren* (“Teoria de Grupos e sua Aplicação à Mecânica Quântica ao Espectro Atômico”), publicado em 1931. Nesse livro, ele propôs a *Lei de Conservação da Paridade (P)*, segundo a qual nenhuma experiência seria capaz de determinar, de maneira unívoca, a direita ou a esquerda. Observe-se que a violação dessa lei foi proposta teoricamente e confirmada experimentalmente, entre 1956 e 1957 (vide verbete nesta série). No ano seguinte, em 1932 (*Akademie der Wissenschaften zu Göttingen Nachrichten, Mathematisch-physikalische Klasse*, p. 546), Wigner estudou a reflexão no tempo – o *operador inversão temporal (T)* – nos fenômenos físicos. Um ano depois, em 1933 (*Zeitschrift für Physik* 83, p. 253; *Physical Review* 43, p. 252), Wigner analisou um estudo fenomenológico da interação próton-nêutron (p-n), chegando mesmo a calcular a secção de choque dessa interação.

Antes de prosseguirmos com os trabalhos de Wigner sobre o núcleo atômico, vejamos qual a situação, em 1932, desse “caroço atômico carregado positivamente e envolvido por uma distribuição esférica uniforme de carga elétrica negativa (*elétrons*) de igual valor, a conhecida *eletrosfera*”, como o definiu Rutherford, em 1911. Conforme vimos em verbete desta série, com a descoberta do *nêutron (n)* pelo físico inglês Sir James Chadwick (1891-1974; PNF, 1935), em 1932 (*Proceedings of the Royal Society of London* A136, pgs. 696; 735), como uma das partículas constituintes do núcleo atômico, juntamente com o próton [este foi descoberto por Rutherford, em 1919 (*Philosophical Magazine* 47, p. 537; 669; 571; 581) como a carga positiva do “caroço atômico”, à qual chamou de *próton (p)*, em 1920 (*Cardiff Reunião, da Academia Britânica para o Desenvolvimento da Ciência*)], provocou uma grande dificuldade para os

físicos, qual seja: a de explicar a razão dos p não se repelirem pela força eletromagnética no interior do núcleo, força essa proposta pelo físico francês Charles Augustin Coulomb (1736-1806), em 1785. Para resolver essa dificuldade, também em 1932, os físicos, o alemão Werner Karl Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932) (*Zeitschrift für Physik* 77, p. 1), o russo Dimitrij Iwanenko (1904-1994) (*Nature* 129, p. 798) e o italiano Ettore Majorana (1906-1938) (que não a publicou) propuseram a hipótese de que os p e n, enquanto partículas constituintes do núcleo atômico se comportavam como partículas únicas [núcleons, nome cunhado pelo físico dinamarquês Christian Möller (1904-1980), em 1941 (*Königliche Danske Videnskabernes Selskab Matematisk-Fysiske Meddelanden* 18, p. 6)], que interagem por intermédio de uma força atrativa capaz de superar a repulsão coulombiana. Ainda em 1932 (*Zeitschrift für Physik* 78, p. 156), Heisenberg defendeu a ideia de que os componentes do núcleo atômico deveriam se caracterizar por um novo número quântico, e não por sua carga elétrica. Por sua vez, em 1933/1934 (*Journal de Physique et le Radium* 4; 5, p. 549; 625), o físico alemão Walter Maurice Elsasser (1904-1991) sugeriu que os núcleos atômicos com um determinado número de prótons ou de nêutrons formavam uma configuração estável; configuração essa mais tarde traduzida por “números mágicos nucleares”, conforme veremos mais adiante. Ainda em 1934, os físicos russos Igor Yevgenyevich Tamm (1895-1971; PNF, 1958) e Iwanenko (*Nature* 133, p. 981) e, independentemente, o físico norte-americano Arnold Nordsieck (n.1911) (*Physical Review* 46, p. 234) demonstraram que para uma energia de interação entre núcleons em torno de 1 MeV, a força entre eles atingiria um alcance de  $\sim 10^{-15}$  cm. Note que a dificuldade de não haver a repulsão coulombiana entre os prótons foi contornada de outra maneira pelo físico japonês Hideaki Yukawa (1907-1981; PNF, 1949), em 1935, ao formular a teoria da *força nuclear* (hoje: *força forte*) entre os núcleons. Segundo Yukawa, essa *força nuclear* decorria da troca, entre os núcleons, de uma partícula cuja massa deveria ser dar ordem de 200 a massa do elétron (vide verbete nesta série). É interessante registrar que, em 1937, T. Schmidt usou a analogia entre as camadas fechadas atômicas bohrianas para sugerir que as *forças nucleares* podem causar um acoplamento spin-órbita, chegando a usar essa ideia para explicar os momentos de dipolos magnéticos ( $\mu$ ) dos núcleos atômicos com núcleons ímpares. Esse acoplamento impunha limites para o número quântico angular total J (soma do número quântico orbital ( $\ell$ ) e do spin (s)), limites esses que ficaram conhecidos como *linhas (limites) de Schmidt*.

Voltemos aos trabalhos de Wigner. Em 1936 (*Physical Review* 49, p. 519), Wigner e o físico norte-americano Gregory Breit (1899-1981) analisaram as transições de ressonância dos *núcleos compostos*. Por outro lado, a ideia de que os núcleons não deveriam ser caracterizados por sua carga elétrica foi retomada, em 1936 (*Physical Review* 50, p. 846), pelos físicos norte-americanos Benedict Cassen (1902-1972) e Edward Uhler Condon (1902-1974), ao apresentarem um formalismo que incorporava a igualdade entre as interações p-p, p-n e n-n, igualdade essa que ficou então conhecida como Princípio da Independência da Carga Elétrica. Logo em 1937 (*Physical Review* 51, p. 106), Wigner usou o grupo de simetria SU(4) [sobre o grupo geral SU(n), ver verbete nesta série] para estudar esse princípio. Nessa ocasião, ele chamou de *spin isotópico* [hoje, *isospin* (I)], ao número quântico proposto por Heisenberg, em 1932, segundo vimos acima, em analogia ao conceito de *spin*, que havia sido introduzido pelos físicos holandeses George Eugene Uhlenbeck (1900-1988) e Samuel Abraham Goudsmith (1902-1978), em 1925 (vide verbete nesta série). Ainda em 1937 (*Physical Review* 51, p. 106), Wigner e o físico norte-americano Eugene Feenberg (1906-1977) desenvolveram um modelo de partícula independente, porém sem considerar o acoplamento spin-órbita, para explicar os *núcleos atômicos leves*. Em 1939 (*Physical Review* 56, p. 530), Wigner e os físicos norte-americanos Charles Louis Critchfield (1910-1994) e Edward Teller (1908-2003) (de origem húngara) estudaram as *forças nucleares* por intermédio da Teoria da Força Fraca, proposta pelo físico italiano Enrico Fermi (1901-1954; PNF, 1938), em 1934 (vide verbete nesta série). Ainda em 1939 (*Mathematische Annalen* 40, p. 149), Wigner apresentou uma classificação sistemática de todas as representações do *grupo de Poincaré* e as correspondentes equações de ondas relativistas. Mais tarde, em 1946 (*Physical Review* 70, p. 606), Wigner desenvolveu um extenso formalismo sobre o *núcleo composto*. No ano seguinte, em 1947 (*Physical Review* 72, p. 29), com a colaboração do físico-matemático norte-americano Leonard Eisenbud (1913-2004), Wigner usou o operador T e o formalismo da *matriz colisão* (*matriz S*) [esta havia sido conceituada por Heisenberg, em 1943 (*Zeitschrift für Physik* 120, p. 513; 673) e, independentemente, também em 1943 (*Helvetica Physica Acta* 16, p. 427), pelo físico suíço Ernst Carl Gerlach Stückelberg (1905-1984)] para fazer um tratamento formal do *núcleo composto*. Note que a simetria das equações relativistas voltou a ser tratada por Wigner, agora com a colaboração do físico alemão Valentin Bargmann (1908-1989), em 1948 (*Proceedings of the National Academy of Sciences* 34, p. 211). A lei de *conservação de carga “pesada”*, ou seja: partículas pesadas como os núcleons (p, n) não poderiam decair (mediada pela força fraca fermiana) em partículas “leves” [elétron ( $e^-$ ) e neutrino ( $\nu$ , hoje:  $\nu_e$ )], foi proposta por Wigner, em 1949 (*Proceedings of the American Philosophical Society* 93, p. 521). [Para

detalhes sobre o trabalho de Wigner relacionado com leis da Natureza e princípios de invariância, ver sua Nobel Lecture (12 de Dezembro de 1963)].

É interessante registrar que Wigner também realizou trabalhos em outros ramos da Física. Por exemplo, em 1928 (*Zeitschrift für Physik* 47, p. 631), ele e o físico alemão Ernst Pascual (1902-1980) aplicaram o método da *segunda quantização* [esta havia sido formulada pelo físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933), em 1927] às *equações de Maxwell* (ver verbete nesta série) no espaço livre. Em 1932 (*Physical Review* 40, p. 749), Wigner propôs a função de onda quântica  $W(p, q)$  – a hoje conhecida *função de Wigner* - que imita as propriedades da função de *distribuição clássica de Boltzmann* (1868). Por outro lado, Wigner e o físico norte-americano Frederick Seitz (1911-2008), em 1933/1934 (*Physical Review* 43; 46 p. 804; 509), estudaram a estrutura de banda do sódio (Na) e propuseram um novo conceito de célula de rede primitiva (“primitive lattice cell”), assim definida: 1) a partir de um dado ponto de uma rede cristalina, constroem-se linhas ligando esse ponto a todos os pontos vizinhos; 2) no ponto médio dessas linhas e normais às mesmas, traçam-se novas linhas ou planos. O menor volume envolvido nessa construção passou a ser conhecido como *célula de Wigner-Seitz*. É oportuno registrar que, por essa ocasião, outros conceitos de células eram conhecidos, como, por exemplo: *cúbico de corpo centrado* (CCC) e *cúbico de face centrada* (CFC).

Agora, vejamos os trabalhos dos Nobelistas/63 Mayer e Jensen. Segundo vimos acima, para explicar a estabilidade elétrica protônica do núcleo atômico, Yukawa propôs, em 1935, uma nova força na Natureza, a *força nuclear*, de curto alcance, para manter juntos os núcleons. Desse modo, surgia a necessidade de explicar tal estabilidade. Ainda em 1935 (*Zeitschrift für Physik* 96, p. 431), o físico alemão Karl Friedrich von Weizsäcker (1912-2007) considerou o núcleo atômico como um pedaço de matéria incompressível e homogênea, apresentando nessa ocasião uma fórmula empírica para o cálculo de sua massa, em função das massas dos núcleons e de sua energia de ligação. No ano seguinte, em 1936 (*Naturwissenschaften* 24, p. 241; *Nature* 137, p. 344), Niels Bohr propôs, praticamente, a mesma ideia de Weizsäcker, ao tentar explicar as *reações nucleares* que estavam sendo realizadas pelo grupo de pesquisas liderado por Fermi, na *Universidade de Roma*, a partir de 1934, nas quais núcleos atômicos, a partir do mais leve [lítio (Li)] até o mais pesado [urânio (U)], eram bombardeados com nêutrons (sobre tais reações, ver verbetes nesta série). Contudo, na medida em que novas *reações nucleares* iam sendo realizadas, o então modelo de Weizsäcker-Bohr – conhecido como *modelo da gota líquida* – tornou-se inadequado para explicar alguns resultados decorrentes dessas experiências. Por exemplo, o resultado mais embaraçoso estava relacionado com os “números mágicos” (nome dado, provavelmente, por Wigner). Esses “números” representam o número de prótons ou de nêutrons que podem ocorrer em um núcleo atômico e que o torna uma estrutura estável. É interessante registrar que, enquanto Yukawa propôs, em 1935, um potencial nuclear do tipo exponencial coulombiano [ $V \propto \exp(r)/r$ ], em 1937 (*Reviews of Modern Physics* 8, p. 82), os físicos norte-americanos Hans Albrecht Bethe (1906-2005; PNF, 1967) (de origem alemã) e Robert Fox Bacher (1905-2004) sugeriram um potencial do tipo mais simples: harmônico ( $V \propto r$ )

Na década de 1940, observou-se que núcleos atômicos que apresentavam o mesmo número de prótons (Z), o mesmo número de nêutrons (N) (sendo  $Z + N = A$ , onde A é a massa atômica), ou ambos, são mais abundantes na Natureza. Por exemplo: hélio:  ${}^2\text{He}^4$  (2p, 2n); oxigênio:  ${}^8\text{O}^{16}$  (8p, 8n); cálcio:  ${}^{20}\text{Ca}^{40}$  (20p, 20n); cálcio e titânio:  ${}^{20}\text{Ca}^{48}$ ,  ${}^{22}\text{Ti}^{50}$  (28n); estânio; estrôncio, ítrio, zircônio e molibdênio:  ${}^{50}\text{Sn}^{124}$  (50p);  ${}^{38}\text{Sr}^{88}$ ,  ${}^{39}\text{Y}^{89}$ ,  ${}^{40}\text{Zr}^{90}$ ,  ${}^{42}\text{Mo}^{92}$  (50n); bário, lantânio e cério:  ${}^{56}\text{Ba}^{138}$ ,  ${}^{57}\text{La}^{139}$ ,  ${}^{58}\text{Ce}^{140}$  (82n); e chumbo e bismuto:  ${}^{82}\text{Pb}^{208}$ ;  ${}^{83}\text{Bi}^{209}$  (126n). Os núcleos atômicos que apresentavam esses “números mágicos”: 2, 8, 20, 28, 50, 82 e 126 tinham as seguintes propriedades: 1) eles são abundantes no Universo; 2) eles têm energia de ligação máxima; e 3) seus momentos de quadrupolo elétrico Q (formado de quatro cargas elétricas) mudam de sinal. Note que, em 1949 (*Physical Review* 76, p. 1415), os físicos norte-americanos Charles Hard Townes (n.1915; PNF, 1964), Henry Michael Foley (1917-1982) e W. Law confirmaram esta terceira propriedade medindo o momento de quadrupolo de vários núcleos atômicos.

Esta era a situação da Física dos núcleons (hoje, Física Nuclear) quando Mayer começou a trabalhar nesse tema. Assim, em 1948 e 1949 (*Physical Review* 74; 75; p. 235; 1969) ela apresentou uma explicação para a existência dos “números mágicos nucleares” formulando o modelo nuclear em camadas, baseando-se no modelo atômico bohriano (1913) e no acoplamento spin-órbita (tratado por Schmidt, em 1937, conforme vimos acima). Com efeito, Mayer observou que a ligação forte em um núcleo estável caracterizado por certo “número mágico”, deixava de ser para um número imediatamente superior, exatamente como ocorre com a estrutura eletrônica bohriana dos átomos. Por exemplo, os gases nobres (ver verbete nesta série) possuem um elevado potencial de ionização devido à existência

de uma camada eletrônica completa. Contudo, os átomos que apresentam um número atômico ( $Z$ ) imediatamente superior, como os alcalinos (composto classificado como base que é solúvel em água), o potencial de ionização é bastante baixo.

Por outro lado, a ideia de usar o acoplamento spin-órbita decorreu de uma pergunta que Fermi fez a Mayer sobre a existência desse tipo de acoplamento no estudo que ela estava fazendo sobre os “números mágicos”. Note que Fermi estava bastante interessado em compreender a natureza desses “números”, pois chegou a usar seu *modelo de gás elétrons* (que havia formulado, em 1926, para entender os metais) nessa compreensão. Para Fermi, os núcleons eram considerados como partículas não-interagentes e confinadas em um poço de potencial esférico. [Maria Goeppert Mayer, Nobel Lecture (12 de Dezembro de 1963)].

Independentemente de Mayer, e também em 1948 (*Die Naturwissenschaften* 35, p. 376) e em 1949 (*Physical Review* 75, p. 1766; *Die Naturwissenschaften* 36, p. 153), Jensen, com o auxílio do físico alemão Otto Haxel (1909-1998) e do físico-químico austríaco Hans Eduard Suess (1909-1993) explicaram os “números mágicos”, com um modelo semelhante ao de Mayer, assumindo um acoplamento spin-órbita na Teoria de Yukawa, referida acima. Segundo esse modelo nuclear em camadas, os núcleons ( $N$ ) se movimentavam no interior do núcleo atômico, em órbitas individuais [*camadas* (“shells”)] em torno de um potencial médio, com simetria esférica. A ideia básica desse modelo é que  $N$  tem diferente energia à medida que seu spin ( $\vec{s}$ ) é paralelo ou antiparalelo, com seu momento angular orbital ( $\vec{\ell}$ ). Desse modo, no interior do núcleo atômico,  $N$  está sujeito a um forte potencial do tipo *interação spin-órbita* ( $\propto \vec{s} \cdot \vec{\ell}$ ). Por outro lado, o  $N$  máximo em cada camada é regido pelo *princípio da exclusão de Pauli* (1925) (ver verbete nesta série) [Johannes Hans David Jensen, Nobel Lecture (12 de Dezembro de 1963)].

O modelo nuclear em camadas teve um razoável sucesso, pois além de explicar os “números mágicos nucleares” previu os momentos angulares ( $\ell$ ) do estado fundamental dos átomos [e, conseqüentemente, a paridade  $P$ , pois ela é definida por:  $(-1)^\ell$ ] e os momentos magnéticos de um grande número de núcleos atômicos, principalmente os que apresentavam  $A$  ímpar. Previu, também, o *isomerismo nuclear*, que é a existência de estados nucleares excitados (metaestáveis) de longa vida-média. É interessante destacar que o *isomerismo nuclear* foi estudado pelos físicos, austro-húngaro Maurice Goldhaber (n.1911) e o norte-americano Andrey W. Sunyar (1920-1986), em 1951 (*Physical Review* 83, p. 906); também em 1951 (*Helvetica Physica Acta* 24, p. 623), por P. Stähelin e P. Preiswerk; e por Goldhaber e R. D. Hill, em 1952 (*Reviews of Modern Physics* 24, p. 179).

Por fim, vejamos os trabalhos dos Nobelistas/75. Apesar do sucesso do modelo nuclear em camadas (MNCa) de Mayer e Jensen descrito acima, ele apresentava dificuldades com relação aos valores experimentais dos momentos de quadrupolo elétrico ( $Q$ ) de alguns núcleos como, por exemplo, aqueles cujas camadas estão incompletas e, portanto, apresentavam um grande número de núcleons “soltos”. Desse modo, essas partículas nucleares exerciam uma intensa força perturbadora sobre a superfície do núcleo atômico tendendo a distorcer sua forma aproximadamente esférica, dando origem a um alto valor de  $Q$ , discrepante com o valor previsto pelo MNCa. Ora, para distorcer o núcleo como indicado acima, é necessário que haja a participação de um grande número de núcleons, caracterizando, dessa maneira, um *efeito coletivo*. A ideia de que o núcleo atômico deveria apresentar uma forma não-esférica como consequência daquele efeito, foi sugerida, em 1950 (*Physical Review* 79, p. 432), por Rainwater depois de tomar conhecimento do trabalho de Townes, Foley e Law, em 1949, o qual afirmava que o  $Q$  das terras raras não era explicado pelo MNCa, segundo discutimos acima. Tal forma não-esférica foi formalizada por Aage Bohr, em 1951 (*Physical Review* 81, p. 134). Dois anos depois, em 1953 (*Physical Review* 89, p. 316), Aage e Mottelson apresentaram o famoso modelo nuclear coletivo (MNCo). Neste MNCo, os núcleons das subcamadas incompletas se movem independentemente sob a ação de um potencial produzido pelo *caroço* (“core”) das subcamadas completas. Como esse potencial não é esféricamente simétrico e estático, como no caso do MNCa, o *caroço* é passível de sofrer deformações resultantes da pressão exercida pelos núcleons na superfície do núcleo atômico. Em vista disso, o núcleo sofre oscilações à semelhança do *modelo da gota líquida*, descrito acima. Note que o MNCo foi capaz de explicar os  $Q$  observados experimentalmente para os núcleos atômicos que apresentam  $A \sim 24$ ,  $160 < A < 190$  e  $A > 230$ , incorretamente previstos pelo MNCa. No MNCo alguns estados excitados do núcleo atômico são análogos aos de um *motor rígido*. Além do mais, para os núcleos par-par, ou seja, com número par de prótons e de nêutrons, esse modelo prevê uma energia rotacional de excitação dos estados estacionários dada por:  $E_{\text{rot}} = (\hbar^2 / 2 I) J(J+1)$ , onde  $J = \ell + s$  (conforme vimos acima) e  $I$  são, respectivamente, o momento angular total e o momento de inércia do núcleo atômico. [Aage Bohr, Nobel Lecture (11 de Dezembro de 1975); Ben Roy Mottelson, Nobel Lecture (11 de Dezembro de 1975)].

Na conclusão deste verbete, é interessante destacar que, na década de 1950, foram discutidos novos modelos do núcleo atômico. Com efeito, em 1954, R. D. Woods e D. S. Saxon (*Physical Review* 95, p. 577) mostraram que os núcleons estavam sob a ação de um potencial radial ( $r$ ) complexo do tipo:  $V = V_0 (1 + i \zeta)$ , com o potencial  $V_0$  definido por:  $V_0 = V_1 / \{1 + \exp [(r - R)/a]\}$ , onde  $V_1$ ,  $R$ ,  $a$  e  $\zeta$  são constantes. Já os físicos norte-americanos Victor Frederick Weisskopf (1908-2003) (de origem austríaca), Herman Feshbach (1917-2000) e C. E. Porter (*Physical Review* 96, p. 1059) formularam um modelo para o núcleo atômico, denominado de *esfera de cristal de contorno difuso* (“cloud cristal ball”), segundo o qual existe um potencial ( $V$ ) na forma de um poço retangular e que contém em seu interior um potencial complexo (*Physical Review* 96, p. 448). Por sua vez, o físico norte-americano David Rittenhouse Inglis (1905-1995) propôs o *modelo excêntrico* (“cranking model”), segundo o qual os núcleons estão sujeitos a um potencial girante e uniforme. Com tal modelo, ele sugeriu que o momento de inércia ( $I$ ) do núcleo poderia ser calculado simplesmente somando os efeitos inerciais de cada partícula nucleônica quando arrastada por aquele potencial. Por outro lado, em 1955, o físico sueco Sven Gösta Nilsson (n.1927) (*Mathematisk-Fysiske Meddelelser Danske Videnskabernes Selskab* 29, número 16) e Nilsson e Mottelson (*Physical Review* 99, p. 1615) calcularam os níveis de energia nuclear considerando o núcleo atômico como sendo esferoidal. Por sua vez, ainda em 1955 (*Mathematisk-Fysiske Meddelelser Danske Videnskabernes Selskab* 30, número 1), Aage Bohr e Mottelson calcularam o  $I$  nuclear usando o “cranking model” de Inglis, destacado acima. Em 1958 (*Annals of Physics* 3, p. 241), Weisskopf e os físicos, o norte-americano John Dirk Walecka (n.1932) e o brasileiro Luís Carlos Gomes (n.1931) estudaram as propriedades da *matéria nuclear*, que é um tipo de matéria cujos núcleos atômicos com o número atômico  $Z \sim A/2$  não sofrem a repulsão coulombiana. Para maiores detalhes sobre modelos nucleares ver, por exemplo, os textos: [Aage Bohr, *Rotational States of Atomic Nuclei* (Munsksgard, 1954); Maria Goeppert-Mayer e Johannes Hans David Jensen, *Elementary Theory of Nuclear Shell Structure* (John Wiley, 1955); Irving Kaplan, *Nuclear Physics* (Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1963); Max Born, *Física Atômica* (Fundação Calouste Gulbenkian, 1971); Robert Eisberg and Robert Resnick, *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles* (John Wiley and Sons, 1974); Emilio Segré, *Nuclei and Particles: An Introduction to Nuclear and Subnuclear Physics* (W. A. Benjamin, Inc., 1977); E. F. Pessoa, F. A. B. Coutinho e Oscar Sala, *Introdução à Física Nuclear* (McGraw-Hill/EDUSP, 1978); A. M. Nunes dos Santos, Maria Amália Bento e Christopher Aurette (Organizadores), *Mulheres na Ciência: Lise Meitner, Maria Goeppert-Mayer, Marie Curie* (Gradiva, 1991); José Maria Filardo Bassalo, *Crônicas da Física 4* (EDUFPA, 1994); Jader Benuzzi Martins, *A história do átomo: de Demócrito aos quarks* (Ciência Moderna, 2001); Francisco Caruso e Vitor Oguri, *Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos* (Campus, 2006)].



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)