



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

Heisenberg, Kramers, Tomonaga e a Matriz S.

Em 1937 (*Physical Review* **52**, p. 1107), o físico norte-americano John Archibald Wheeler (1911-2008) estudou o espalhamento de partículas em Física Nuclear e, nessa ocasião, mostrou que a matriz desse espalhamento, a famosa **matriz S** (S), deveria apresentar algumas propriedades como, por exemplo, a unitariedade [o produto dela com sua hermitiana simétrica conjugada (S^+) deve ser comutativo e formar a matriz unitária 1: $SS^+ = S^+S = 1$]. Contudo, apesar de ele realizar os cálculos usando a Mecânica Quântica Não-Relativista, ele achava que a mesma deveria ter a invariância relativística, invariância esta que foi tratada por Heisenberg como veremos a seguir. Com efeito, em outubro de 1943, durante a *Segunda Guerra Mundial* (SGM), Heisenberg esteve em Copenhague e como a Dinamarca estava ocupada pelos Nazistas, a *Universidade de Copenhague* estava fechada, e ele se reuniu na casa do físico holandês Hendrik Anthony Kramers (1894-1952), com quem já trabalhara, em um informal colóquio, para discutir sobre um trabalho que concluiu em 09 de setembro de 1942, no qual provou que S era unitária e que poderia ser escrita como: $S = \exp(i\eta)$, onde η é uma matriz hermitiana especial que só conteria elementos observáveis. Nessa discussão, Kramers observou que os elementos de η , os momentos k ($= p/\hbar$), deveriam ser complexos. Depois desse encontro, Kramers e Heisenberg (já de volta a Berlim) ficaram trabalhando nessa nova teoria da **matriz S**, agora com funções analíticas. No dia 30 de outubro de 1942, Heisenberg concluiu um segundo artigo no qual mostrou que S poderia ser escrita na forma: $S = 1 + R$, onde R é uma matriz hermitiana. No dia 31 de outubro ele escreveu para Kramers convidando-o para escreverem um artigo juntos sobre a **matriz S**. Contudo, como a Holanda estava ocupada pelos Nazistas, Kramers recusou a oferta em carta escrita no dia 01 de dezembro de 1943. Em vista disso, Heisenberg escreveu mais dois artigos sobre a S . Os três artigos foram publicados em 1943 (*Zeitschrift für Physik* **120**, p. 513; 673) e 1944 (*Zeitschrift für Physik* **123**, p. 93) e o quarto foi reproduzido somente no *Heisenberg Collected Works* **A2**, p. 687, publicado em 1985. Nesses trabalhos, Heisenberg apresentou o tratamento relativístico da **matriz unitária S**, no qual a **amplitude de transição da matriz S** (S_{if}) é dada por $S_{if} \equiv \langle f | S(k) | i \rangle$, onde $|i\rangle$ e $|f\rangle$ representam os estados inicial e final do sistema físico considerado. Ainda nesses trabalhos, Heisenberg mostrou que os zeros da $S(k)$ correspondem a estados estacionários de sistemas ligados ou as energias de partículas elementares individuais. Note-se que um tratamento análogo a esse foi apresentado também em 1943 (*Helvetica Physica Acta* **16**, p. 427) e 1944 (*Helvetica Physica Acta* **17**, p. 3) pelo físico suíço Ernst Carl Gerlach Stückelberg (1905-1984) e, ainda em 1944 (*Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde* **11**, p. 134), por Kramers. (Cassidy, op. cit.).

Sobre esse tratamento de Heisenberg existe um fato curioso. Seus cálculos foram enviados para o Japão em um submarino alemão e entregue ao físico japonês Yoshio Nishina (1890-1951). Em 1947 (*Journal of the Physical Society of Japan* **2**, p. 151), o físico japonês Sin-itiro Tomonaga (1906-1979; PNF, 1965) usou a **matriz S** para estudar a junção de microondas. [Val L. Fitch and Jonathan L. Rosner, **Elementary Particle Physics in the Second Half of the Twentieth Century, IV: Twentieth Century Physics I** (Institute of Physics Publishing/American Institute of Physics, 1995)]. É interessante destacar que o trabalho sobre junções de microondas foi também realizado nos Estados Unidos durante a *Segunda Guerra Mundial* (SGM) (1939-1945), por ocasião em que estavam desenvolvendo o **radar** [*radio detection and ranging* (“detecção e telemetria pelo rádio”)], sendo o físico norte-americano Julian Seymour Schwinger (1918- 1994; PNF, 1965) um dos teóricos do grupo do *Radiation*

Laboratory, no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), que participava daquele desenvolvimento.

Note-se que o entendimento da **matriz S** foi continuado pelo físico dinamarquês Christian Möller (1904-1980). Com efeito, já em 1932 (*Annalen der Physik* **14**, p. 531), ele havia estudado o espalhamento elástico-quântico entre dois elétrons relativistas, conhecido desde então como **espalhamento Möller**. Em 1945 e 1946 (*Køngelige Danske Videnskab Selskab Matematisk-Fysiske Meddelanden* **22**, p. 1; **23**, p. 1), ele investigou a interação de um sistema físico por intermédio da versão relativista da S de Heisenberg-Stückelberg-Kramers, realizada em 1943 e 1944, como vimos acima. Ainda em 1946, o físico chinês Shih-Tsun Ma (1913-1962) (*Physical Review* **69**, p. 668) e o físico neerlandês-britânico Dirk ter Haar (1919-2002) (*Physica* **12**, p. 509) estudaram os estados estacionários decorrentes da continuação analítica da **matriz S**, ou seja: $S(k) = \exp[2i\delta_\ell(-ik)]$, onde δ_ℓ são os **deslocamentos de fase** (*phase shifts*). Logo depois, em 1947 (*Physical Review* **72**, p. 29), o físico húngaro norte-americano Eugene Paul Wigner (1902-1995; PNF, 1963) e L. Eisenbud demonstraram que: $T S^{-1} = S^{-1}$, onde o operador T vale: $T = |\psi, t\rangle = |\psi, -t\rangle$.

Por fim, também em 1947, Ma (*Physical Review* **71**, p. 195) e o físico suíço Res Jost (1918-1990) (*Helvética Physica Acta* **20**, p. 256) mostraram que existem alguns zeros da S(k) que não correspondem a estados estacionários ou a partículas elementares. Como Jost era assistente do físico alemão Wolfgang Pauli (1900-1958; PNF, 1945) depois que ele voltou para a *Universidade de Zurique*, em 1946, e Ma tinha sido aluno de Pauli [quando este foi Professor Visitante no *Instituto de Física Avançada* (IFA), em Princeton, New Jersey, nos Estados Unidos da América (USA), entre 1935 e 1936], esse resultado obtido, independentemente por eles, confirmou a decisão (acreditamos!) de Pauli de ele haver renunciado ao formalismo da **matriz S** em um Congresso, promovido pela *Sociedade Britânica de Física*, que aconteceu em Cambridge, em 1946. (Cassidy, op. cit.; Piza, op. cit.).



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)