



# CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

[www.bassalo.com.br](http://www.bassalo.com.br)

## O Entrelaçamento ou Emaranhamento (“Entanglement”) Quântico em Física.

Em verbetes desta série, vimos como foi desenvolvida a Teoria Quântica (TQ) [Mecânica Quântica (Não-Relativista - MQ e Relativista - MQR) e Eletrodinâmica Quântica - EQ] na década de 1920, principalmente devido aos trabalhos dos físicos, os alemães Max Born (1882-1970; PNF, 1954), Werner Karl Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932) e Ernst Pascual Jordan (1902-1980) (1924-1925), o austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961; PNF, 1933) (1926), o francês, o Príncipe Louis Victor Pierre Raymond de Broglie (1892-1987; PNF, 1929) (1926-1927), o austro-suíço Wolfgang Pauli Junior (1900-1958; PNF, 1945) (1927) e o inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933) (1927-1928). O sucesso na aplicação da TQ em temas científicos relacionados com o micromundo, principalmente na Física da Matéria Condensada (décadas de 1930 e 1940), resultou na grande revolução tecnológica da informática e da nanotecnologia, cujos principais resultados, foram, por exemplo: as invenções do *transistor* (1947-1948), da *fibra óptica* (1952), do *maser* (1953-1954), do *chip* (1959), do *laser* (1960), do LED (“Light-Emitting Diode”) (1962), da MBE (“Molecular Beam Epitaxy”) (1968), do *sensor CCD* (“Charge-Coupled Device”) (1970), da *câmara digital* (1978) e do *LCD* (“Liquid-Crystal Display”) (1979), e as descobertas do *fulereno* ( $C_{60}$ ) (1985), do *nanotubo* (1991), da *magnetoresistência* (1994), do *grafeno* (2004) e da *molibdenita* (2011).

Apesar do grande sucesso da TQ, existe ainda uma grande discussão sobre os seus fundamentos. Por exemplo, se ela é uma teoria indeterminista (Born e Heisenberg, 1926-1927) ou determinista (de Broglie, 1926-1927) [esta teoria, conhecida como Teoria das Variáveis Ocultas (TVO), foi retomada pelo físico norte-americano David Joseph Bohm (1917-1992), em 1951-1952, e ela tenta completar a TQ com outras variáveis (posição e velocidade) não consideradas pela própria TQ]. Segundo vimos em verbetes desta série, essa discussão começou em 1935, com o célebre artigo dos físicos, o germano-suíço-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921), o russo Boris Podolsky (1896-1966) e o norte-americano Nathan Rosen (1909-1955) – o famoso **paradoxo EPR** – no qual é conjecturado que a função de onda schrödingeriana ( $\psi$ ) não representa toda a realidade física (ela é incompleta). Ainda em 1935, o físico norueguês Niels Henrik David Bohr (1885-1962; PNF, 1922) contestou essa conjectura afirmando que  $\psi$  representa toda a realidade física (ela é completa). Também em 1935, Schrödinger colocou mais “fogo nessa fogueira de argumentos de autoridade” com o também célebre artigo – o **gato de Schrödinger** – no qual ele discute se  $\psi$  pode ser aplicada a problemas macroscópicos. Essa discussão epistemológica é resumida no seguinte. Segundo o EPR – *os estados reais de objetos separados espacialmente são independentes um do outro*. Contudo, para Bohr, tais estados são inseparáveis. Desse modo, surgiu a polêmica **separabilidade versus inseparabilidade**. Essa discussão teve uma primeira resposta em favor de Bohr com o trabalho teórico realizado, em 1964 (*Physics* **1**, p. 135), pelo físico irlandês John Stewart Bell (1928-1990), no qual ele demonstrou o hoje famoso **Teorema de Bell**

(traduzido, inicialmente, pela **desigualdade de Bell** - DB) :  $1 + C(b,c) \geq |C(a,c) - C(a,b)|$ , onde C significa a *correlação* de pares de partículas e a, b e c são os resultados dos aparelhos de medida que medem algum parâmetro (posição, spin etc.) das mesmas. No entanto, essa desigualdade não é usada na prática, pois ela envolve três resultados. Desse modo, são usadas várias desigualdades envolvendo apenas dois resultados; daí, então, falarmos em **desigualdades de Bell** ([en.wikipedia.org/wiki/Bell's\\_theorem](http://en.wikipedia.org/wiki/Bell's_theorem)).

A polêmica referida acima é resumida na afirmativa: - *A hipótese do realismo local (separabilidade) (a. objetos possuem valores definitivos que não dependem do processo de medição; b. eles podem ser conectados por uma troca subluminal de informação) é incompatível com a Mecânica Quântica (inseparabilidade)*. [Sobre o desdobramento dessa polêmica Einstein versus Bohr, ver: John Archibald Wheeler and Wojciech Hubert Zurek (Editors), **Quantum Theory and Measurement** (Princeton University Press, 1983); Olival Freire Junior, **Sobre as Desigualdades de Bell, Caderno Catarinense de Ensino de Física 8**, p. 212 (1991); Peter R. Holland, **The Quantum Theory of Motion: An Account of the de Broglie-Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics** (Cambridge University Press, 1993); Genaro Auletta, **Foundations and Interpretation of Quantum Mechanics** (World Scientific, 2001); Pang Xiao-Feng e Feng Yuan-Ping, **Quantum Mechanics in Nonlinear Systems** (World Scientific, 2005); Olival Freire Junior, Osvaldo Pessoa Junior e Joan Lisa Bromberg (Organizadores), **Teoria Quântica: Estudos históricos e implicações culturais** (EdUEPB/Livraria da Física, 2010)].

A busca da comprovação experimental da DB e, conseqüentemente, da instabilidade da TVO, levou à descoberta de dois novos fenômenos físicos: o **entrelaçamento** ou **emaranhamento** (“entanglement”) e a **de(s)coerência quânticos**. Neste verbete, vamos tratar do **entrelaçamento quântico**. Uma primeira experiência para testar a TVO foi realizada, em 1967 (*Physical Review Letters* **18**, p. 575), por Carl A. Kocher e Eugene D. Commins ao medirem a correlação da polarização linear entre pares de fótons do decaimento em cascata do cálcio ( $\text{Ca}^{40}$ ):  $6\ ^1S_0 \rightarrow 4\ ^1P_1 \rightarrow 4\ ^1S_0$ . Um tipo de experiência análoga a essa foi também proposta pelos físicos norte-americanos John Francis Clauser (n.1942), Michael A. Horne, Abner Shimony (n.1928) e Richard A. Holt, em 1969 (*Physical Review Letters* **23**, p. 880), e realizada, em 1972 (*Physical Review Letters* **28**, p. 938), por Clauser e Stuart J. Freedman. Por outro lado, em 1974 (*Physical Review* **D10**, p. 526), Clauser e Horne analisaram as conseqüências experimentais de teorias quânticas locais objetivas. Note-se que, em 1976 (*Physical Review Letters* **37**, p. 465), outra experiência envolvendo a correlação da polarização linear entre dois fótons do decaimento em cascata do mercúrio ( $\text{Hg}^{200}$ ):  $7\ ^3S_1 \rightarrow 6\ ^3P_1 \rightarrow 6\ ^1S_0$ , foi realizada por Edward S. Fry e Randall C. Thompson. Ainda em 1976 (*Physical Review* **D14**, p. 2543), M. Laméhi-Rachti e W. Mittig mediram a correlação de spin em um espalhamento próton-próton. Mais tarde, em 1978 (*Reports on Progress in Physics* **41**, p. 1881), Clauser e Shimony realizaram novos testes experimentais para investigar suas implicações relacionadas com a DB. Em 1979 (*Physical Review* **D19**, p. 473), William K. Wootters e Wojciech Hubert Zurek (n.1951) e em 1980 (*Physical Review* **D21**, p. 1698), Lawrence S. Bartell examinaram a complementaridade bohriana (onda-partícula) (**inseparabilidade quântica**: IQ) na experiência de dupla-fenda que havia sido proposta por Einstein, em 1934 (*Essays in Science*, Philosophical Library, p. 100). Observe-se que todos esses trabalhos (teóricos e experimentais) foram favoráveis a Bohr com relação à IQ. (Ver

esses artigos em Wheeler e Zurek, op. cit.). É interessante registrar que, em 1973 (*Harvard University - preprint*), Holt e F. M. Pipkin realizaram uma experiência envolvendo fótons de baixa energia no decaimento de  $\text{Hg}^{198}$  e na qual confirmaram a DS. O mesmo foi observado, em 1975, por G. Fioraci, S. Gutkowski, S. Natarrigo e R. Pennisi em experiência envolvendo fótons de alta energia decorrente de aniquilação pósitron-elétron (Pang e Feng, op. cit.)

Na década de 1980 novas experiências sobre a polêmica entre Einstein *versus* Bohr (**separabilidade versus inseparabilidade**) foram realizadas pelo físico francês Alan Aspect (n.1947) e seus colaboradores. Com efeito, em 1975 (*Physics Letters* **A54**, p. 117) e 1976 (*Physical Review* **D14**, p. 1944), Aspect havia proposto um tipo de experiência para testar a TVO. Esta proposta só começou a ser colocada em prática em 1981 (*Physical Review Letters* **47**, p. 460), quando Aspect e os físicos franceses Philippe Grangier (n.1957) e Gérard Roger realizaram uma experiência na qual mostraram a violação da DB, indicando a **inseparabilidade quântica**. Esse resultado foi confirmado, em 1982, por Aspect, Grangier e Roger (*Physical Review Letters* **48**, p. 91) e por Aspect, Roger e o físico francês Jean Dalibard (n.1958) (*Physical Review Letters* **49**, p. 1804). Nessas experiências também foi usado a correlação da polarização entre pares de fótons do decaimento em cascata de elementos químicos. Contudo, diferentemente dos experimentos realizados por Clauser e colaboradores, em que cada fóton do par de fótons ( $\gamma_1/\gamma_2$ ), era dirigido para um polarizador ( $P_1/P_2$ ), Aspect usou comutadores ópticos para dirigir cada um dos fótons do par (p.e.:  $\gamma_1$ ), ou para um polarizador ( $P_{1A}$ ) ou para um outro ( $P_{1B}$ ), com orientações diferentes (A/B). (Auletta, op. cit.). É interessante ressaltar que a correlação indicada acima é hoje conhecida como **entrelaçamento** ou **emaranhamento** (“entanglement”) **quântico**. Falar no resultado recente que o Nassar assinalou.



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)