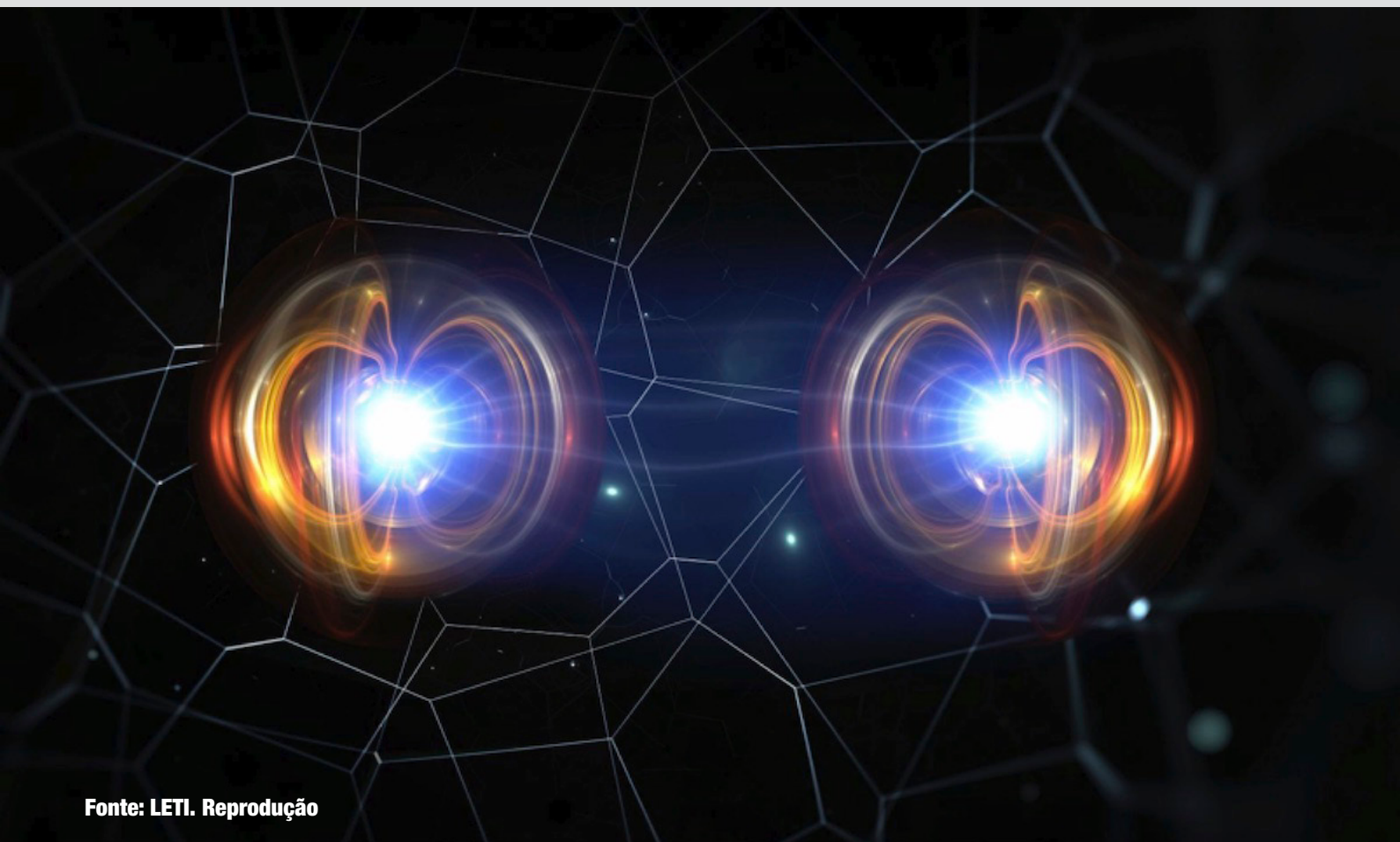




Fonte: LETI. Reprodução

Nos anos 1990, a Óptica Quântica cresceu muito no mundo todo. Muitas técnicas novas de experimentos foram trazidas para o Brasil, acompanhando o que há de mais moderno no mundo.

Do laboratório ao mundo: A óptica quântica brasileira

por Marcelo Paleólogo Elefteriadis de França Santos

Resumo

Nos anos 1990, a Óptica Quântica e a Informação Quântica se expandiram no Brasil, integrando o país ao cenário global. Com investimentos em institutos de pesquisa e formação de talentos, novas técnicas experimentais e teóricas floresceram, como no estudo das interações fóton-átomo e das propriedades quânticas da luz. Eventos como o *Quantum Information School and Workshop de Paraty* consolidaram a comunidade científica, impulsionando gerações de pesquisadores e inserindo o Brasil na vanguarda da pesquisa quântica.

Palavras-chave: Óptica Quântica; Revolução Quântica; Ciência Brasileira; Física Quântica

Introdução

Na calorenta primavera de 1994, um grupo de estudantes do Instituto de Física

Gleb Wataghin da Unicamp (IFGW) dedica parte de suas tardes a discutir suas surpresas com a recém-apresentada mecânica quântica. Entre sucos

e salgados da ainda existente cantina, repõem-se as calorias perdidas para entender a bombástica mudança de paradigma imposta pelas descobertas

dos noventa anos anteriores. Conversas semifilosóficas sobre o papel aparentemente inexorável da aleatoriedade para a correta descrição de fenômenos microscópicos, suas consequências para questões essenciais como o livre-arbítrio e eventuais formas de contorná-la com as tais variáveis ocultas alternavam-se com a resolução de listas de exercícios ou a construção de bem-humoradas versões para explicar o sumiço de guarda-chuvas a partir do seu decaimento em cliques de papel.^[1]

É nesse contexto de assombro coletivo que, em uma dessas tardes, interrompemos nossos debates para assistir ao colóquio do Professor Luiz Davidovich, famoso físico ainda da PUC-RJ na época e hoje Professor Emérito da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). O colóquio ocorreria, como de costume, no auditório do prédio administrativo do IFGW, uma simpática construção em tijolos aparentes, defronte da “praça do básico”, o ponto central de convergência da Unicamp. O auditório, localizado no andar térreo desse prédio, uma sala grande em formato de anfiteatro com inclinação suave, encontrava-se abarrotado de pesquisadores, pós-graduandos, estudantes de graduação e curiosos a ocupar todas as cadeiras e mais escadas e paredes. Todos os presentes, fãs de *Jornadas nas Estrelas* ou não, atraídos pelo instigante título da palestra que prometia apresentar uma versão factível do fenômeno de teleportação quântica.^[2]

Projetadas na parede do fundo, bem desenhadas

transparências auxiliavam a narrativa que mostrava, passo a passo, uma proposta teórica para teletransportar o estado quântico de um átomo.^[3] Os desenhos, que incluíam uma piada irreproduzível atualmente sobre a cobaia a ser utilizada, mais pareciam um croquis de truque de mágica. O átomo, saído do forno, passava primeiro por um colimador e um seletor de velocidades. Seguia, então, para uma região onde uma sequência de pulsos de luz e micro-ondas preparava-o em um estado eletrônico superexcitado, também chamado de estado de Rydberg. A próxima etapa era a mais crucial: o viajante solo entrava numa cavidade supercondutora, um arranjo de espelhos côncavos posicionados um de frente ao outro com as concavidades para dentro, cada qual com refletância praticamente perfeita, e interagia por uma pequena fração de segundo com o campo eletromagnético da região focal deste arranjo. Essa interação emaranhava o átomo com o campo da cavidade e o viajante seguia para uma segunda cavidade igual, onde completava seu ciclo, desexcitando-se para outro estado de Rydberg de menos energia e transferindo o emaranhamento para a segunda cavidade. Os campos eletromagnéticos das duas cavidades, agora emaranhados, faziam a função que, no seriado, cabia aos tubinhos da sala de teletransporte. A máquina de teletransporte estava pronta e a etapa final envolvia interagir outros dois átomos, um com cada cavidade ressonante, e realizar medições em um deles para teletransportar seu estado eletrônico para o outro.

A plateia atônita, hipnotizada pelo farto sorriso e, sobretudo, pelo contagiante brilho nos olhos do apresentador, não tinha dúvida: ainda que teletransportar o estado eletrônico de um único átomo não resolvesse o desconforto do ônibus (sem ar-condicionado) que a maioria utilizava para visitar os parentes nos feriados, não estávamos ali diante de um *gedankenexperiment*, pensado somente para auxiliar na compreensão da teoria. A análise clara, apoiada por valores realistas dos parâmetros envolvidos, indicava que era apenas uma questão de tempo até que algum laboratório do mundo realizasse o experimento. De fato, as primeiras teleportações ocorreriam apenas três anos depois, ainda que em outro sistema físico — ambas teletransportaram o estado quântico da polarização de um fóton.^[4,5]

Saímos da sala de seminários numa superposição de assombro, entusiasmo e empolgação percebida nos corredores ou de volta à cantina, pelo fuzuê instalado. A estética do plano apresentado era inquestionável. A beleza dos mecanismos descobertos da natureza saltava aos olhos. Quântica não era apenas instigante e revolucionária. Era também bonita e encantadora. E seus exercícios mais simples, alcançáveis aos estudantes, mas aparentemente restritos à imaginação, justamente pelo excesso de simplicidade, concretizavam-se experimentalmente nos laboratórios de óptica quântica mundo afora em belíssimos e cuidadosos arranjos em que átomos e fótons interagiam controladamente

"A quântica não era apenas instigante e revolucionária. Era também bonita e encantadora."

em uma emaranhante dança nanoscópica, invisível ao olho humano, mas detectável por sofisticados aparelhos por nós construídos. Talvez seja essa a melhor definição de Óptica Quântica: é a área da física em que problemas simples de livros-textos e *gedankenexperiments* se transformam em experimentos realizáveis. Impossível não pensar na ponta de inveja que Einstein, Bohr, Heisenberg, Dirac, Schroedinger, Born e companhia devem sentir das gerações atuais que conseguem ver no laboratório o que, para eles, muitas vezes eram apenas ideias abstratas. Inveja essa compartilhada, natural e maravilhosamente, pelas atuais gerações por serem eles os autores originais de tais ideias. Óptica Quântica é, também, a área da física onde mais claramente as duas revoluções quânticas se encontram: onde dispositivos tais como lasers, *masers*, detectores semicondutores ou supercondutores de alta eficiência e criogenia de hélio líquido, todos frutos da primeira revolução quântica, se combinam para manipular coerentemente e mensurar estados quânticos da matéria e da luz em protocolos de computação, criptografia e sensoriamento quânticos, aplicações práticas da segunda revolução quântica.

Nesse dia, estava traçado, também, meu caminho

pela física. Frustrado pela falta da necessária habilidade motora, mas trazendo comigo o espírito da física experimental, encontrara naquela palestra o meio-termo ideal: uma área de pesquisa que permitia, ao mesmo tempo, fazer física com lápis e papel, tarefa dentro das minhas capacidades, combinada com mirabolantes croquis a guiar os colegas experimentais nas realizações práticas destes cálculos e seus resultados.

A conexão Brasil-França e o desenvolvimento teórico.

Juntei-me, como mesmando, ao Grupo de Óptica Quântica do Instituto de Física da UFRJ em março de 1995. Capitaneado pelos professores Moysés Nussenzveig, Nicim Zagury e Luiz Davidovich, este grupo fora importado da PUC-RJ no ano anterior numa manobra que envolveu a diretoria do Instituto junto à reitoria da Universidade e que transportou, classicamente, vários professores do prédio Cardeal Leme, na Rua Marquês de São Vicente, 225, para o terceiro andar do Bloco A do Centro de Tecnologias, na Avenida Athos da Silveira Ramos, 149. Reunidos naquele grupo, não estavam apenas os maiores expoentes da Óptica Quântica teórica do país, estavam, de fato, os criadores da área no Brasil. Os professores Moysés Nussenzveig e Nicim Zagury, então em seus joviais sessenta e poucos anos, pertenciam à primeira geração de Ópticos Quânticos brasileiros. Moysés

(1932-2022), autor dos consagrados livros de física básica, vencedores do prêmio Jabuti em 1999, é considerado o pai, ou a essa altura, o bisavô, da Óptica Quântica brasileira. Seus pioneiros trabalhos^[6,7] no espalhamento de luz por pequenas esferas, chamado de dispersão de Mie, e sua conexão com o arco-íris e com o efeito Glória,^[8] aquele halo que vemos às vezes, por exemplo, quando olhamos um avião no céu em dia nublado, renderam-lhe o merecido Prêmio Max Born de óptica em 1986. Um físico à moda antiga, para além de suas obras didáticas, Moysés nos deixou diversos livros da física que pesquisou, incluindo uma excelente introdução à área de Óptica Quântica^[9] que, infelizmente, nunca foi republicada, mas pode ser encontrada em diversas bibliotecas do país (Figura 1). Seu mais marcante traço, contudo, era a generosidade com que atendia estudantes e seus pedidos. O prazer de despertar os estudantes para as belezas da física era seu ponto fraco. Generosidade essa compartilhada pelo colega Zagury. Vindo, originalmente, das áreas de física nuclear e partículas e campos, Nicim abraçou a Óptica Quântica nos anos oitenta e desse casamento saíram diversos trabalhos muito significativos em eletrodinâmica quântica de cavidades e íons armadilhados, dentre outros temas. Por exemplo, em um dos trabalhos mais emblemáticos, uma colaboração com o físico israelense Yakir Aharonov e com seu ex-estudante Luiz Davidovich deu início à área de pesquisa de Caminhos Aleatórios

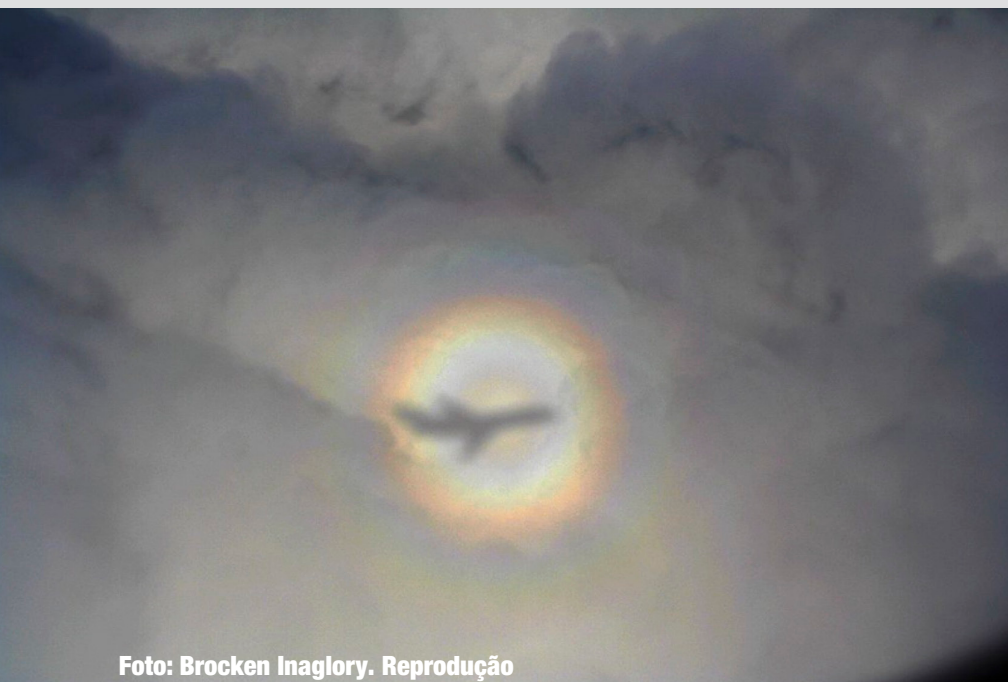


Foto: Brocken Inaglory. Reprodução

Figura 1. Efeito glória na sombra de um avião

Quânticos.^[10] A produção mais volumosa na época, contudo, veio de uma colaboração estabelecida no primeiro Colóquio Franco-Brasileiro de física, realizado no início da década de 1980 quando diversos pesquisadores brasileiros e franceses estabeleceram conexões que perduram até hoje e que influenciaram significativamente o desenvolvimento da área no país e no mundo. Em Óptica Quântica, a principal colaboração se deu entre o grupo do Rio de Janeiro e o grupo de Serge Haroche do *Laboratoire Kastler-Brossel* (LKB) em Paris. Após duas décadas investindo na preparação e caracterização de átomos de Rydberg e de espelhos supercondutores altamente refletivos, o laboratório de Serge Haroche se aproximava das condições necessárias para realizar *experimentos controlados de manipulação e medição de*

sistemas quânticos individuais. É nesse momento que o físico francês encontra no grupo carioca uma parceria ideal para o desenvolvimento de propostas experimentais no tema. Dessa parceria, surgem diversos trabalhos de grande impacto que, mais tarde, quando transformados em experimentos, formaram a base para o prêmio Nobel de Serge Haroche em 2012. Destacam-se, nesse particular, os trabalhos^[1] para medição quântica não-demolidora do estado físico do campo eletromagnético de uma cavidade ressonante.^[11,12] Em seu laboratório, também, forma-se doutor, em meados da década de 1990, um dos primeiros pesquisadores da geração seguinte da Óptica Quântica brasileira, o físico Paulo Nussenzveig, filho natural e neto científico do Moysés, que viria, pouco depois, a estabelecer um dos principais

laboratórios da área no Brasil, no Instituto de Física da USP de São Paulo.

A conexão Brasil – Estados Unidos e o desenvolvimento experimental.

Além da colaboração com a França, o grupo do Rio de Janeiro mantinha, também, uma conexão muito ativa com a Universidade de Rochester, no estado de Nova Iorque, nos Estados Unidos. Rochester mantém há várias décadas grupos de excelência na área de Óptica Quântica e era lá que Moysés se encontrava, no fim da década de 1960, quando orientou o doutorado do jovem Luiz Davidovich em Teoria do Laser.

Coincidentemente, vem de Rochester também, ainda que de forma desconectada, o impulso inicial para o desenvolvimento da Óptica Quântica experimental no Brasil. De fato, se na década de 1980 o avanço teórico se dava sobretudo ao trio do Rio de Janeiro, os primórdios da Óptica Quântica experimental brasileira se desenvolveriam em outra parte do sudeste, no departamento de física da Universidade Federal de Minas Gerais, em Belo Horizonte. Tendo começado sua carreira ainda na década de 1960, na interação da luz com sistemas de matéria condensada, é em Rochester, no laboratório do brilhante físico norte-americano Leonard Mandel, o maior Óptico Quântico experimental da história, que o mineiro Geraldo Alexandre

Barbosa aprende sobre os experimentos para investigar propriedades quânticas da propagação de fótons correlacionados produzidos pelo processo de Conversão Paramétrica Descendente Espontânea (SPDC em inglês). Decidido a importar a técnica para o Brasil, Geraldo Alexandre Barbosa monta um dos laboratórios de referência na área e forma alguns dos expoentes nacionais da segunda geração de experimentais de Óptica Quântica, com destaques para o jovem Carlos Monken que, em conjunto com o então recém-contratado Sebastião Pádua, herda o laboratório da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e Paulo Souto Ribeiro, “exportado” para montar um laboratório também de grande sucesso no grupo do Rio de Janeiro e hoje professor da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O laboratório da UFRJ foi custeado por um projeto da chamada de Programa de Grupos de Excelência do CNPq (PRONEX). O mesmo projeto financiou, também, a construção do laboratório de Antônio Zelaquett Khoury, ex-mestrando de Luiz Davidovich, na Universidade Federal Fluminense (UFF). Completava-se aí, no quarteto USP-UFMG-UFRJ-UFF, o time principal de Ópticos Quânticos experimentais de segunda geração do Brasil. Destas duas gerações, trabalhos de destaque incluem a investigação das propriedades transversais de pares de fótons propagantes,^[13,14] um apagador quântico para luz,^[15] análogos clássicos de emaranhamento,^[16,17] a demonstração de emaranhamento

de três cores em feixes intensos de luz^[18,19] e medições de emaranhamento e seu decaimento em sistemas ópticos.^[20, 21]

Os anos 2000 e a nova Óptica Quântica brasileira

Os anos 1990 testemunham uma expansão enorme da Óptica Quântica no mundo, e não foi diferente no Brasil. Núcleos teóricos e experimentais surgem país afora, acompanhados de uma produção significativa e qualificada de trabalhos que inserem o país definitivamente no contexto mundial. Ao mesmo tempo, a área de Informação Quântica, com suas promissoras ideias de computação e criptografia, se desenvolve rapidamente, atraindo a atenção de teóricos e experimentais de Óptica Quântica mundo afora. Sistemas atômicos de dois e três níveis viram “qubits” e “qutrits”, interações destes sistemas com fótons viram “portas lógicas” e a mudança de linguagem é acompanhada de uma mudança no padrão de financiamento. É nesse contexto que os físicos de Óptica Quântica do país se reúnem com outros de Sistemas Quânticos Abertos e montam o primeiro Instituto do Milênio de Informação Quântica. Uma das mais exitosas iniciativas do CNPq e de várias Fundações de Amparo à Pesquisa estaduais para fomento de pesquisa no país, as duas edições dos Institutos do Milênio, de 2001 a 2004 e de 2004 a 2009, sucedidas pelos Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia, significaram um

“Os anos 1990 testemunham uma expansão enorme da Óptica Quântica no mundo, e não foi diferente no Brasil.”

investimento continuado de cerca de 25 anos que permitiu uma gigantesca expansão do sistema de pesquisa nacional com a criação e fortalecimento de diversos laboratórios, a introdução de novas técnicas e a formação de milhares de jovens qualificados.

É na esteira dessa expansão, iniciada no segundo governo Fernando Henrique Cardoso e fortalecida significativamente nos dois primeiros governos Lula e no primeiro governo Dilma, que diversos jovens brasileiros são recapturados pela rede de pesquisa nacional e é nessa recaptura de jovens talentos que a área de Óptica Quântica nacional experimenta sua renovação. Diversas novas técnicas experimentais são introduzidas no país, sintonizadas com o estado-da-arte mundial. Como destaques, podemos mencionar pesquisas da interação controlada de fótons com nuvens atômicas na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), com nano e micro-ressonadores na Unicamp, com oscilador paramétrico óptico na USP, em ressonância magnética nuclear na UFABC e no CBPF, na levitação de microesferas na PUC-RJ e na geração de pares de fótons em processo Raman na UFMG e UFRJ, dentre várias outras. Da mesma forma, a pesquisa teórica

"Diversas novas técnicas experimentais são introduzidas no país, sintonizadas com o estado-da-arte mundial.

na área também aumenta significativamente de tamanho, expandindo-se na direção de informação quântica em tema de pesquisa e espalhando-se pelo país em termos geográficos. Núcleos se formam em todos os estados do Sul, no Rio de Janeiro, São Paulo e Minas, em Brasília, Goiás e Mato Grosso, assim como em diversos estados do Nordeste, com destaque para Rio Grande do Norte e Pernambuco. Ainda no fim dos anos 1990, o grupo do Rio de Janeiro ganha a adição do pesquisador acriano Ruynet Matos Filho, importado diretamente da Alemanha, onde fizera doutorado, e um dos principais nomes da terceira geração de teóricos do país. Os anos subsequentes viram uma nova expansão com a criação de diversos grupos que cobrem boa parte do território

nacional. Jovens formados no Brasil ou no exterior são absorvidos pelo sistema acadêmico nucleando novos centros de pesquisa teórica com contribuições significativas para a interpretação de física quântica, suas conexões com outras teorias de física, suas aplicações práticas em sistemas de computação e criptografia, dentre muitas outras aplicações.

Entre estes novos pesquisadores, encontram-se três dos jovens que formavam a audiência da palestra sobre teleportação dada no auditório da Unicamp em 1994: Marcelo Terra Cunha, hoje Professor do Instituto de Matemática e Estatística da Unicamp, Daniel Jonathan, Professor do Instituto de Física na UFF, e o autor dessas mal traçadas linhas, que passou dez anos na UFMG antes de "voltar para casa" em 2016 como professor do IF da UFRJ. Três colegas de turma que, inspirados, talvez por suas próprias discussões, talvez pela palestra de Luiz Davidovich e, certamente, pela beleza intrínseca dos mecanismos por trás do funcionamento da natureza, reencontraram-se na área de pesquisa. É da

iniciativa destes três que nasce, em 2007, o principal evento de informação quântica do país, o *Quantum Information School and Workshop*, um evento bi-anual que ocorre na cidade de Paraty e que completa, esse ano, sua nona edição. Ao trazer pesquisadores do mundo inteiro para o Brasil, incluindo o prêmio Nobel de Física Alain Aspect, e colocá-los, ao longo dos anos, em contato com centenas de estudantes e pesquisadores brasileiros, esse evento ajudou a solidificar a posição brasileira no cenário internacional da Informação Quântica e, de certa forma, fechou o primeiro arco iniciado ainda na década de 1960. O próximo arco já se encontra aberto e é certamente muito promissor, cabendo aos jovens pesquisadores já em atividade e aos que virão garantir sua continuidade e evolução.

Marcelo Paleólogo Elefteriadis de França Santos é professor do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e colíder⁵⁴⁵ do grupo de ótica quântica e informação quântica da UFRJ.

NOTAS

[i] A motivação do prêmio pela Fundação Nobel é justamente "for ground-breaking experimental

methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems".

REFERÊNCIAS

- [1] JONATHAN, Daniel. *The physics of lost things*. Physics World, v. 12, n. 9, p. 76, 1999.
- [2] BENNETT, Charles H. et al. *Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels*. Physical Review Letters, v. 70, n. 13, p. 1895-1899, 1993.
- [3] DAVIDOVICH, L. et al. *Teleportation of an atomic state between two cavities using nonlocal microwave fields*. Physical Review A, v. 50, p. R895, 1994.
- [4] BOUWMEESTER, D. et al. *Experimental quantum teleportation*. Nature, v. 390, n. 6660, p. 575-579, 1997.
- [5] BOSCHI, D. et al. *Experimental realization of teleporting an unknown pure quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels*. Physical Review Letters, v. 80, n. 6, p. 1121-1125, 1998.
- [6] NUSSENZVEIG, H. M. *High-frequency scattering by a transparent sphere. I. Direct reflection and transmission*. Journal of Mathematical Physics, v. 10, n. 1, p. 82-+, 1969.
- [7] NUSSENZVEIG, H. M. *High-frequency scattering by a transparent sphere. II. Theory of rainbow and glory*. Journal of Mathematical Physics, v. 10, n. 1, p. 125-+, 1969.
- [8] WIKIPEDIA. *Glory (optical phenomenon)*. Disponível em: [https://en-m-wikipedia-org.translate.google/wiki/Glory_\(optical_phenomenon\)?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc](https://en-m-wikipedia-org.translate.google/wiki/Glory_(optical_phenomenon)?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc). [9] NUSSENZVEIG, H. M. *Introduction to quantum optics*. [S.l.: s.n.], [s.d.].
- [10] AHARONOV, Y.; DAVIDOVICH, L.; ZAGURY, N. *Quantum random walks*. Physical Review A, v. 48, n. 2, p. 1687, 1993.
- [11] BRUNE, M. et al. *Quantum nondemolition measurement of small photon numbers by Rydberg-atom phase-sensitive detection*. Physical Review Letters, v. 65, n. 8, p. 976, 1990.
- [12] BRUNE, M. et al. *Manipulation of photons in a cavity by dispersive atom-field coupling: Quantum-nondemolition measurements and generation of "Schrödinger cat" states*. Physical Review A, v. 45, n. 7, p. 5193, 1992.
- [13] MONKEN, C. H.; RIBEIRO, P. H. S.; PÁDUA, S. *Transfer of angular spectrum and image formation in spontaneous parametric down-conversion*. Physical Review A, v. 57, n. 4, p. 3123, 1998.
- [14] FONSECA, E. J. S.; MONKEN, C. H.; PÁDUA, S. *Measurement of the de Broglie wavelength of a multiphoton wave packets*. Physical Review Letters, v. 82, n. 14, p. 2868, 1999.
- [15] WALBORN, S. P. et al. *Double-slit quantum eraser*. Physical Review A, v. 65, n. 3, p. 033818, 2002.
- [16] BORGES, C. V. S. et al. *Bell-like inequality for the spin-orbit separability of a laser beam*. Physical Review A, v. 82, n. 3, p. 033833, 2010.
- [17] PEREIRA, L. J.; KHOURY, A. Z.; DECHOUM, K. *Quantum and classical separability of spin-orbit laser modes*. Physical Review A, v. 90, n. 5, p. 053842, 2014.
- [18] VILLAR, A. S. et al. *Generation of bright two-color continuous variable entanglement*. Physical Review Letters, v. 95, n. 24, p. 243603, 2005.
- [19] COELHO, A. S. et al. *Three-color entanglement*. Science, v. 326, n. 5954, p. 823-826, 2009.
- [20] WALBORN, S. P. et al. *Experimental determination of entanglement with a single measurement*. Nature, v. 440, n. 7087, p. 1022-1024, 2006.
- [21] ALMEIDA, M. P. et al. *Environment-induced sudden death of entanglement*. Science, v. 316, n. 5824, p. 579-582, 2007.