

---

## COMUNICAÇÕES: O PRÊMIO NOBEL DE FÍSICA DE 2012<sup>+</sup>\*

---

*José Maria Filardo Bassalo*  
Fundação Minerva  
Belém – PA

### Resumo

*Neste artigo, trataremos do Prêmio Nobel de Física de 2012, concedido aos físicos, o francês Serge Haroche e o norte-americano David Jeffrey Wineland pelo desenvolvimento de técnicas experimentais capazes de medir e manipular sistemas quânticos individuais.*

**Palavras-chave:** *Prêmio Nobel de Física de 2012. Manipulação Quântica. Haroche e Wineland.*

### Abstract

*In this article we will talk about the 2012 Nobel Prize in Physics, awarded to the physicists, the frenchman Serge Haroche and the north-american David Jeffrey Wineland for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems.*

**Keywords:** *2012 Physics Nobel Prize. Quantum Manipulation. Haroche and Wineland.*

---

<sup>+</sup> The 2012 Physics Nobel Prize

<sup>\*</sup> *Recebido: janeiro de 2013.  
Aceito: fevereiro de 2013.*

O Prêmio Nobel de Física (PNF) de 2012 foi concedido aos físicos, o francês Serge Haroche (n.1944) e o norte-americano David Jeffrey Wineland (n.1944) pelo desenvolvimento de técnicas experimentais capazes de medir e manipular sistemas quânticos individuais, usando a Óptica Quântica. Eles, no entanto, usaram técnicas diferentes e complementares: Haroche controlou e mediu fótons de átomos carregados (íons) aprisionados em uma armadilha; Wineland aprisionou íons em uma armadilha, e usou fótons para manipulá-los sem mudar seu estado quântico. Vejamos, então, a vida e os trabalhos desses nobelistas, assim como a participação, em alguns desses trabalhos, de físicos brasileiros como Nicim Zagury (n.1934), Luiz Davidovich (n.1946) e Paulo Alberto Nussenzveig (n.1966) (no grupo do Haroche) e Vanderlei Salvador Bagnato (n.1958) (no grupo do Wineland).

Haroche nasceu em Casablanca, Marrocos, no dia 11 de setembro de 1944. Depois de realizar seus primeiros estudos em Casablanca, foi para Paris, em 1956. Lá, estudou na *École Normale Supérieure* (ENS) entre 1963 e 1967, participando do Grupo de Pesquisas do físico francês Claude N. Cohen-Tannoudji (n.1933; PNF, 1997), tendo obtido os Diplomas de *Agrégation de Physique* e *Doctorat de Troisième Cycle*, ambos em 1967. Em 1971, recebeu o *Doctorat d'État* da *Université de Paris VI*, tendo Cohen-Tannoudji como orientador. É oportuno destacar que Cohen-Tannoudji, depois de defender seu Doutorado, em dezembro de 1962, na *Universidade de Paris*, sob a orientação dos físicos franceses Alfred Kastler (1902-1984; PNF, 1966) e Jean Brossel (1918-2003) trabalhando com o bombeamento (“pumping”) óptico de isótopos ímpares de mercúrio (Hg), começou seu próprio programa de pesquisa que o levou a desenvolver o conceito de *átomo vestido*, que é um sistema global *átomo + fóton* descrito por um hamiltoniano independente do tempo e possuindo níveis de energia verdadeiros. Assim, na década de 1980, Cohen-Tannoudji usou o conceito de *átomo vestido* para manipular átomos com fótons e, com isso, conseguir o resfriamento óptico de átomos isolados; inicialmente com o *resfriamento Sísifo* (*Sisyphus cooling*) e, posteriormente, com o resfriamento do tipo *resfriamento sub-recuo* (*subrecoil cooling*), também conhecido como VSCPT (*Velocity Selective Coherent Population Trapping*). Na década de 1990, Cohen-Tannoudji e seus colaboradores estenderam a técnica VSCPT para duas e três dimensões e, com isso, conseguiram atingir temperaturas na escala do *nanoKelvin* (nK). Para detalhes do trabalho de pesquisa de Cohen-Tannoudji, ver verbete nesta série.

Voltemos a Haroche. Durante o tempo em que trabalhou no grupo de Cohen-Tannoudji, entre 1965 e 1973, Haroche trabalhou com esse grupo em uma série de artigos que podem ser vistos em: **Serge Haroche Complete Publication**

**List (1965-2011)** ([Internet](#), acesso em 09/11/2012) e web science/Haroche S. Depois de obter seu Doutorado, em 1971, ele foi realizar um estágio de Pós-Doutorado (*post-doc*) na *Stanford University* (SU), entre 1972 e 1973, no Grupo de Pesquisas do físico norte-americano Arthur Leonard Schawlow (1921-1999; PNF, 1981) que trabalhava com *espectroscopia laser*. Por exemplo, na década de 1970, Schawlow e seu grupo desenvolveram o mecanismo de *resfriamento Doppler* para diminuir a velocidade dos átomos, por intermédio de um feixe de *laser* dirigido no sentido contrário ao movimento desses átomos. Assim, em 1973<sup>1</sup>, Haroche e os físicos norte-americanos Jeffrey A. Paisner (n.1948) e Schawlow usaram pulsos de *laser broadband* (*laser de banda larga*) para produzir batimentos quânticos em fluorescência; e os físicos franceses Bernard Cagnac (n.1931), Gilbert Grynberg (1948-2003) e François Biraben (n.1949)<sup>2</sup> anunciaram que haviam conseguido um sinal de absorção de dois-fótons que exibia estreita característica *Doppler-livre*.

Depois de seu *post-doc* na SU (para a qual voltou em 1976 e 1979), Haroche retornou a Paris e, em 1975, tornou-se Professor Titular da *Université de Paris VI*, cargo que exerceu até 2001, quando foi nomeado para ser Professor da Cadeira de Física Quântica no *Collège de France*, sendo eleito por seus pares, em setembro de 2012, seu atual Administrador. De 1975 até o presente, Haroche ensinou em várias instituições de ensino, tais como: *Escola Politécnica de Paris* (1973-1984); *Harvard University* (1981); *Yale University* (1984-1993); e *Université Pierre et Marie Curie* (1975-2001). Também nesse intervalo de tempo, recebeu prêmios importantes: **Grande Prêmio Jean Ricard** da *Sociedade Francesa de Física* (1983); **Prêmio Einstein for Laser Science** da *Society of Optical and Quantum Electronics* (1988); **Prêmio Humbolt** (1992); **Medalha Albert A. Michelson** do *Instituto Franklin* (1993); **Prêmio Caterina Tomassoni** da “*La Sapienza*”, *Università di Roma* (2001); **Prêmio Charles H. Townes** da *Optical Society of America* (2007); **Medalha de Ouro** do *Centre National de la Recherche Scientifique* (CNRS) (2009); e PNF (2012).

Vejamos, agora, os trabalhos de Haroche que o levaram ao nobelato. Depois de trabalhar com os *átomos vestidos* de Cohen-Tannoudji e com Schawlow, em *espectroscopia laser*, segundo vimos acima, Haroche começou seu próprio programa de pesquisa que envolvia a *espectroscopia laser* [analisando batimentos (*beats*) quânticos e superradiância] e a Física Atômica. Nesta, ele investigou os

---

<sup>1</sup> **Physical Review Letters**, v. 30, p. 948, 1973.

<sup>2</sup> **Journal de Physique**, Paris, v. 34, p. 845, 1949.

*átomos Rydberg*, que são estados atômicos gigantes, de órbitas eletrônicas horizontais, com tempo de decaimento radioativo muito longo e, portanto, particularmente sensíveis a microondas e, desse modo, bem adaptados ao estudo da interação entre luz e matéria. Assim, ele mostrou que tais átomos, reunidos em uma cavidade supercondutora contendo alguns fótons, são bem adequados para testar a *descoberta quântica* (vide verbete nesta série) e para realizar operações lógicas quânticas (envolvendo o “*gato*” de *Schrödinger*; sendo este representado por um campo elétrico oscilante de alguns fótons armazenados em uma cavidade de alta qualidade). Note que tais operações são muito importantes para o desenvolvimento da informação quântica (*computação quântica*) que constituirá uma nova revolução científica neste Século 21 (wikipedia/Serge\_Haroche).

As pesquisas próprias de Haroche e seu grupo [dentre eles, físicos de várias nacionalidades como, por exemplo, F. Bernardot, M. Brune, J. Dreyer, C. Gabbanini, G. Gawlick, J. C. Gay, P. Goy, M. Gross, E. W. Hagley, J. Hare, V. Lefèvre-Seguin, A. Maali, X. Maître, L. Moi, G. Nogues, Jean Michel Raimond (n.1955), F. Schmidt-Kaler, A. Steinberg e C. Wunderlich] podem ser encontradas na relação de seus trabalhos (até 2011) acima indicada. Neste verbete, serão destacados apenas os que foram realizados com a participação dos físicos brasileiros Davidovich, Paulo Nussenzveig e Zagury. Assim, temos: 1) Brune, Raimond, Goy, Davidovich and Haroche, **Realization of a Two-Photon Maser Oscillator** (1987)<sup>3</sup>; 2) Davidovich, Raimond, Brune and Haroche, **Quantum Theory of a Two-Photon Micromaser**<sup>4</sup> (1987); 3) Brune, Raimond, Goy, Davidovich and Haroche, **The Two-Photon Rydberg Atom Micromaser**, *Institute of Electrical and Electronic Engineers*<sup>5</sup> (1988); 4) Davidovich, Raimond, Brune and Haroche, **Multistability and Chaos in a Two-Photon Microscopic Maser**, *IN: N. B. Abraham, F. T. Arecchi and L. A. Lugiato (Editors), Instabilities and Chaos in Quantum Optics II* (Plenum, 1988); 5) Raimond, Brune, Davidovich, Goy and Haroche, **The Two-Photon Rydberg Atom Micromaser**, *IN: Haroche, Gay and Grynberg (Editors), Atomic Physics XI* (World Scientific, 1989); 6) Brune, Haroche, Lefèvre-Seguin, Raimond and Zagury, **Quantum Nondemolition Measurement of Small Photon Number by Rydberg Atom Phase Sensitive Detec-**

---

<sup>3</sup> **Physical Review Letters**, v. 59, p. 1899, 1987.

<sup>4</sup> **Physical Review**, v. A36, p. 3771, 1987.

<sup>5</sup> **Journal of Quantum Electronics**, v. 24, p. 1323, 1988.

tion<sup>6</sup> (1990); 7) Brune, Raimond, Haroche and Davidovich, **QND Measurements and Schrödinger Cat States Generation in Cavity QED**, *IN*: E. Giacobino and G. Camy (Editors), **Laser Spectroscopy X** (World Scientific, 1992); 8) Brune, Haroche, Raimond, Davidovich and Zagury, **Manipulation of Photons in a Cavity by Dispersive Atom-Field Coupling: Quantum Nondemolition Measurements and Generation of Schrödingers's Cats**<sup>7</sup> (1992); 9) Bernardot, Nussenzevig, Brune, Raimond and Haroche, **Vacuum Rabi Splitting Observed on a Microscopic Atomic Sample in a Microwave Cavity**<sup>8</sup> (1992); 10) Nussenzevig, Bernardot, Brune, Hare, Raimond, Haroche e Gawlick, **Preparation of High-Principal-Quantum-Number "Circular" States of Rubidium**<sup>9</sup> (1993); 11) Davidovich, Maali, Brune, Raimond and Haroche, **Quantum Switches and Nonlocal Microwave Fields**<sup>10</sup> (1993); 12) Haroche, Brune, Raimond and Davidovich, **Mesoscopic Quantum Coherence in Cavity QED**, *IN*: Ehlutzky (Editor), **Fundamental of Quantum Optics III** (Springer-Verlag, 1994); 13) Brune, Nussenzevig, Schmidt-Kaler, Bernardot, Maali, Raimond and Haroche, **From Lamb Shift to Light Shifts: Vacuum and Sub-Photon Cavity Fields Measured by Atomic Interferometry**<sup>11</sup> (1994); 14) Davidovich, Zagury, Brune, Raimond and Haroche, **Teleportation of an Atomic State Between Two Cavities Using Nonlocal Microwaves Fields**<sup>12</sup> (1994); 15) Davidovich, Brune, Raimond and Haroche, **Mesoscopic Quantum Coherences in Cavity QED: Preparation and Decoherence Monitoring Schemes**<sup>13</sup> (1996). É oportuno registrar que, ainda em 1996<sup>14</sup>, Brune, Hagley, Dreyer, Maître, Wunderlich, Raimond e Haroche apresentaram o resultado de uma experiência sobre a *descoerência quântica*.

---

<sup>6</sup> **Physical Review Letters**, v. 65, p. 976, 1990.

<sup>7</sup> **Physical Review**, v. A45, p. 5193, 1992.

<sup>8</sup> **Europhysics Physics Letters**, v. 17, p. 33, 1992.

<sup>9</sup> **Physical Review**, v. A48, p. 3991, 1993.

<sup>10</sup> **Physical Review Letters**, v. 71, p. 2360, 1993.

<sup>11</sup> **Physical Review Letters**, v. 72, p. 3339, 1994.

<sup>12</sup> **Physical Review**, v. A50, p. R895, 1994.

<sup>13</sup> **Physical Review**, v. A53, p. 1295, 1996.

<sup>14</sup> **Physical Review Letters**, v. 77, p. 4887, 1996.

A esses trabalhos realizados por brasileiros no grupo de pesquisa do nobelista Haroche, devem-se acrescentar os realizados pelo físico-biólogo brasileiro-norte-americano André Nussenzweig (n.1960) (primo de Paulo Nussenzweig, a quem se agradece essa informação): 1) Nussenzweig, Hare, Steinberg, Moi, Gross and Haroche, **A Continuous Beam of Circular Rydberg Atoms for Fundamental Tests and Applications in Metrology**<sup>15</sup> (1991); 2) Hare, Nussenzweig, Gabbanini, Goy, Gross and Haroche, **Towards a Rydberg Constant Measurement on Circular Atoms**, *Institute of Electrical and Electronic Engineers*<sup>16</sup> (1993).

Ainda sobre Haroche, é interessante destacar que ele participou da edição dos seguintes livros: 1) Haroche, J. C. Pebay-Peyroula, Theodor W. Hänsch (n.1941; PNF, 2005) and S. Harris (Editors), **Laser Spectroscopy**<sup>17</sup> (Springer, 1975); 2) R. Balian, Haroche and S. Liberman (Editors), **Frontiers in Laser Spectroscopy**<sup>18</sup> (North Holland, 1977); e 3) Haroche, Gay and Grynberg, **Atomic Physics XI**<sup>19</sup> (World Scientific, 1989).

De 2001 até 2012, Haroche escreveu uma série de artigos [isoladamente e com antigos colaboradores (principalmente Brune e Raimond) e novos colaboradores: H. Amini, A. Auffeves, J. Bernu, P. Bertet, P. Bosland, S. Deléglise, I. Dotsenko, A. Emmert, P. Facchi, S. Gleyses, J. J. Greffet, C. Guerlin, E. Hagley, P. Hayfil, U. B. Hoff, E. Jacques, E. Jahier, S. Kuhr, F. Lissillour, R. Long, A. Lupascu, P. Maioli, T. Meunier, P. Milman, M. Mirrahimi, J. Mosley, T. Nirrengarten, H. Ollivier, S. Osnaghi, S. Pascasio, B. Peaudecerf, A. Perrin, B. Plaçais, A. Qarry, A. Rauschenbeutel, P. Rouchon, C. Roux, T. Rybarczyk, C. Sayrin, I. Tailleur, B. Visentin, W. von Klitzing, F. Yamagushi e X. Zhou] sobre Espectroscopia Laser, Física Atômica, Eletrodinâmica Quântica (QED – *Quantum Electrodynamics*), Coerência e Descoerência Quânticas, Manipulação de Átomos e assuntos correlatos, que foram descritos nos seguintes livros: **La Physique Quan-**

---

<sup>15</sup> **European Physics Letters**, v. 14, p. 755, 1991.

<sup>16</sup> **Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 42, p. 331, 1993.

<sup>17</sup> **Proceedings of the Second International Conference**, Megève, 1975, Springer, 1975.

<sup>18</sup> **Proceedings of Les Houches Summer Scholl**, Session XXVII, North Holland, 1977.

<sup>19</sup> **Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference in Atomic Physics**, World Scientific, 1989.

tique<sup>20</sup> e **Exploring the Quantum: Atoms, Cavities and Photons**<sup>21</sup>, em parceria com Jean Michel Raimond. Para mais detalhes da vida e do trabalho científico de Haroche, indica-se ver sua *Nobel Lecture* (08/12/2012): **Controlling Photons in a Box and Exploring the Quantum to Classical Boundary**. É oportuno registrar que, na apresentação dessa *Nobel Lecture*, Haroche fez um destaque especial para o artigo<sup>22</sup> que escreveu junto com Brune, Raimond, Davidovich e Zagury.

Em relação ao outro nobelista, Wineland nasceu em Milwauke, Wisconsin, (USA), no dia 24 de fevereiro de 1944; completou sua graduação no *Encina High School*, em Sacramento, Califórnia, em 1961. Em 1965, obteve o grau de Bacharel em Física na *University of California*, em Berkeley. Para realizar seu doutorado, foi trabalhar no grupo do físico norte-americano Norman Foster Ramsey Junior (1915-2011; PNF, 1989), na *Harvard University*, com quem obteve seu doutoramento, em 1970, com a tese intitulada **The Atomic Deuterium Maser**. O estudo desse tipo de maser foi apresentado por Ramsey e Wineland, em 1972<sup>23</sup>. Note-se que Ramsay trabalhou com o físico austro-norte-americano Isidor Isaac Rabi (1898-1988; PNF, 1944), que se tornara famoso por haver desenvolvido a técnica da **Ressonância Magnética Nuclear** (RMN), em 1937, na *Columbia University*.

Depois do doutoramento, Wineland foi trabalhar no grupo de pesquisas do físico germano-norte-americano Hans Georg Dehmelt (n.1922; PNF, 1989), na *University of Washington* (UW), em Seattle, USA. Dehmelt havia se doutorado, em 1950, com o físico alemão Hubert Kruger, na *Universidade de Göttingen* (UG), Alemanha, cuja tese tinha como tema a descoberta da **Ressonância Quadrupolar Nuclear**. Graças a essa descoberta, ele realizou seu *post-doc* na *Duke University*, entre 1952 e 1955, ocasião em que usou a RMN para alinhar íons e átomos por impacto eletrônico. Ainda em 1955, voltou à UW, onde construiu o dispositivo conhecido como *magnetron* [ou *Penning trap* (*armadilha Penning*)], devido às primeiras experiências realizadas pelo físico holandês Frans Michel Penning (1894-1953), em 1936], com o qual aprisionou um elétron por cerca de 10 segundos, em 1959. Na UW, Dehmelt formou seu Grupo de Pesquisas objetivando o aprisionamento de íons, dessa vez usando a técnica que aprendera com seu profes-

---

<sup>20</sup> Paris: Fayard, 2004.

<sup>21</sup> Oxford: Oxford University Press, 2006.

<sup>22</sup> *Physical Review*, v. A45, p. 5193, 1992.

<sup>23</sup> *Physical Review*, v. A5, p. 821, 19, 1972.

sor na UG, o físico alemão Wolfgang Jakob Paul (1913-1993; PNF, 1989), a **Paul trap**, que usa uma corrente de radiofrequência para manter um campo elétrico alternante que isola e confina elétrons e íons em um pequeno espaço.

Contando com a colaboração de antigos e de novos estudantes de doutoramento e de pós-doutoramento, Dehmelt continuou melhorando cada vez mais a técnica de aprisionamento de íons. Assim, Dehmelt e dois de seus estudantes de *post-doc*, Wineland e Philip Ekstrom, em 1973<sup>24</sup>, fizeram o primeiro congelamento (*cooling*) de um único elétron e produziram o **oscilador monoeletrônico**. Mais tarde, em 1975, Wineland e Dehmelt<sup>25</sup> e, independentemente, Hänsch e Schawlow<sup>26</sup>, sugeriram o mecanismo de **resfriamento Doppler** para diminuir a velocidade de átomos por intermédio de um feixe de *lasers* dirigido no sentido contrário ao movimento desses átomos. Note que esse resfriamento leva esse nome porque um átomo em movimento muda sua frequência por causa do **efeito Doppler** (vide verbete nesta série). Ainda em 1975, Wineland e Dehmelt discutiram os princípios do calorímetro para aprisionar íons<sup>27</sup>, como também mediram a anomalia do momento magnético do elétron ou do pósitron<sup>28</sup>, usando a técnica do *cooling* que haviam desenvolvido, em 1973, com a participação de Ekstrom, segundo vimos acima.

Em 1975, Wineland foi para o então *National Bureau of Standards* (hoje, *National Institute of Standard and Technology* – NIST), onde criou seu grupo de aprisionamento de íons (*ion storage group*). Assim, em 1978, Wineland, R. Drullinger e F. Walls<sup>29</sup> e, independentemente, W. Neuhauser, M. Hohenstatt, Peter E. Toschek (n.1933) e Dehmelt<sup>30</sup> conseguiram resfriar nuvens de íons por *laser*, respectivamente, magnésio (Mg) e bário (Ba). Em 1979<sup>31</sup>, Wineland e Wayne M.

---

<sup>24</sup> **Physical Review Letters**, v. 31, p. 1279, 1973.

<sup>25</sup> **Bulletin of the American Physical Society**, v. 20, p. 637, 1975.

<sup>26</sup> **Optics Communications**, v. 13, p. 68, 1975.

<sup>27</sup> **Journal of Applied Physics**, v. 46, 919, 1975.

<sup>28</sup> **Bulletin of the American Physical Society**, v. 20, p. 637, 1975.

<sup>29</sup> **Physical Review Letters**, v. 40, p. 1639, 1978.

<sup>30</sup> **Physical Review Letters**, v. 41, p. 233, 1978.

<sup>31</sup> **Physical Review A20**, p. 1521, 1979.



Itano discutiram o famoso Teorema Óptico de Earnshaw, segundo o qual não poderia haver aprisionamento atômico usando espalhamento de luz. Esse teorema foi demonstrado, em 1842<sup>32</sup>, pelo Reverendo Samuel Earnshaw (1805-1888), ao mostrar que “partículas sob a ação de forças que variam com o inverso do quadrado da distância não podem estar em equilíbrio estático”.

Nas décadas de 1980 e 1990, Wineland continuou suas pesquisas no NIST e, também, na *University of Colorado*, em Boulder. Em 1986, os grupos de pesquisa de Dehmelt [com Warren Nagourney e Jon C. Sandberg<sup>33</sup>], Toschek [com T. Sauter, Neuhauser e Rainer Blatt<sup>34</sup>] e o de Wineland [com J. C. Bersquist, Randall G. Hulet e Itano<sup>35</sup>] propuseram que o aprisionamento de átomos neutros poderia ser realizado usando uma combinação de campos externos magnéticos e elétricos. Com esse tipo de experiência, observaram saltos quânticos em um átomo isolado. Em 1988<sup>36</sup>, S. L. Gilbert, J. J. Bollinger e Wineland anunciaram o resultado de uma experiência sobre o aprisionamento de uma nuvem de íons, usando *laser* em temperaturas baixas. Essa experiência tinha como objetivo a obtenção de pequenos cristais iônicos puros para melhorar a precisão dos relógios atômicos. Ainda em 1988<sup>37</sup>, Richard J. Cook propôs uma experiência para observar o *paradoxo quântico de Zenão* (PQZ) (vide verbete nesta série) envolvendo transições induzidas de um íon preso. Wineland voltou ao aprisionamento de íons, em 1989<sup>38</sup>, em trabalho que realizou com de F. Driedrich, Bersquist e Itano e Wineland. No ano seguinte, em 1990<sup>39</sup>, Itano, D. J. Heinzen, Bollinger e Wineland, usando aproximadamente 5000 íons de berílio ( ${}^9\text{Be}^+$ ), armazenados em uma *armadilha Penning* e resfriados por um *laser* abaixo de 250 mK, conseguiram realizar a experiência que havia sido proposta por Cook, em 1988. Porém, a interpretação do “colapso da função de

---

<sup>32</sup> **Transactions of the Cambridge Philosophical Society**, v. 7, p. 97, 1842.

<sup>33</sup> **Physical Review Letters**, v. 56, p. 2797, 1986.

<sup>34</sup> **Physical Review Letters**, v. 57, p. 1696, 1986.

<sup>35</sup> **Physical Review Letters**, v. 57, p. 1699, 1986.

<sup>36</sup> **Physical Review Letters**, v. 60, p. 2022, 1988.

<sup>37</sup> **Physica Scripta T21**, p. 49, 1988.

<sup>38</sup> **Physical Review Letters**, v. 62, p. 403, 1989.

<sup>39</sup> **Physical Review A41**, p. 2295, 1990.

onda” dada por Wineland e colaboradores para explicar essa experiência sofreu uma série de críticas, comentadas e respondidas por eles, em 1991<sup>40</sup>. Note-se que, como o PQZ relaciona-se com o problema da “medida na Mecânica Quântica”, ele foi [e ainda é (novembro de 2012)] objeto de muita discussão. [Gennaro Auletta, *Foundations and Interpretation of Quantum Mechanics* (World Scientific, 2001)]. Em 1993<sup>41</sup>, Bagnato, G. P. Lafyatis, o físico norte-americano William D. Phillips (n.1948; PNF, 1997) e Wineland aprisionaram íons de sódio ( $_{11}\text{Na}^+$ ) usando *laser* em uma armadilha magneto-óptica.

A *computação quântica* (CQ) foi objeto de estudo por parte de Wineland, em 1995<sup>42</sup> quando ele, Christopher Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King e Itano demonstraram experimentalmente a existência de um portão (*gate*) lógico quântico fundamental para o desenvolvimento da CQ. Registre-se que experiência análoga a essa foi também realizada, em 1995<sup>43</sup>, por Q. Turchette, C. Hood, W. Lange, H. Mabushi e H. Jeffrey Kimble. Observe-se que, ainda em 1995, Wineland, S. J. Smith e o físico norte-americano Carl E. Wieman (n.1951; PNF, 2001) editaram o *Physics Atomics XIV* (American Institute of Physics, New York).

Em 1996, Meekhof, Monroe, King, Itano e Wineland estudaram o aprisionamento de íons para estudar a geração de seus estados mocionais não clássicos<sup>44</sup>, assim como criaram vários estados quânticos: térmico, coerente e espremido (*squeezed*)<sup>45</sup>. Com a participação de D. Leibfried, esse grupo de Wineland, ainda em 1996<sup>46</sup>, determinou experimentalmente o estado quântico mocional de um íon de berílio ( $_{9}\text{Be}^+$ ) aprisionado em uma *Paul trap*. Também em 1996<sup>47</sup>, Meekhof, Monroe, King e Wineland armazenaram um íon de berílio ( $_{9}\text{Be}^+$ ) em um vácuo

---

<sup>40</sup> *Physical Review A* **43**, p. 5168, 1991.

<sup>41</sup> *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*, v. 8, p. 24, 1993.

<sup>42</sup> *Physical Review Letters*, v. 75, p. 4714, 1995.

<sup>43</sup> *Physical Review Letters*, v. 75, p. 4710, 1995.

<sup>44</sup> *Physical Review Letters*, v. 76, p. 1796, 1996.

<sup>45</sup> *Physical Review Letters*, v.77, p. 2346, 1996.

<sup>46</sup> *Physical Review Letters*, v. 77, p. 4281, 1996.

<sup>47</sup> *Science*, v. 272, p. 1131, 1996.

ultra-alto combinando campos elétricos estático e oscilante aplicados a eletrodos finos metálicos.

É interessante destacar que, antes de compartilhar o PNF2012, Wineland recebeu outras homenagens, registradas a seguir: *Prêmio Davisson-Germer in Atomic or Surface Physics* (1990); *Prêmio William F. Meggers da Optical Society of America* (1990); *Prêmio Einstein for Laser Science da Society of Optical and Quantum Electronics* (1996); *Prêmio Rabi do IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society* (1998); *Prêmio Arthur L. Schawlow in Laser Science* (2001); *Medalha Frederic Ives da Optical Society of America* (2004); *Medalha da National of Science in the Engineering Sciences* (2007); *Prêmio Herbert Walther da OSA* (2008); *Medalha Benjamin Franklin* (2010) [compartilhada com os físicos, o espanhol Juan Ignacio Cirac Sasturain (n.1965) e o austríaco Peter Zoller (n.1952)] (Wikipedia/David\_J\_Wineland).

Na década de 2000 até 2012, Wineland escreveu, isoladamente, e com antigos (principalmente Bollinger, Itano, King, Leibfried, Meekhof, Monroe) e novos colaboradores (J. M. Amini, N. Ashby, M. D. Barrett, J. A. Beall, A. Ben-Kish, J. C. Bergquist, D. J. Berkeland, S. Bickman, M. J. Biercuk, S. Bize, R. B. Blakestad, R. Blatt, B. B. Blinov, R. Bowler, J. Britton, K. R. Brown, A. Brusch, J. Chiaverini, C. W. Chou, I. L. Chuang, R. Clark, Y. Colombe, F. C. Cruz, E. A. Curtis, B. DeMarco, S. A. Diddams, R. E. Drullinger, R. J. Epstein, T. M. Fortier, R. Frahm, J. Gaebler, D. Hanneke, T. P. Heavner, D. A. Hite, L. Hollberg, J. P. Home, X. P. Huang, J. Hughes, D. B. Hume, E. N. Ivanov, S. R. Jefferts, B. M. Jelenkovic, M. Jensen, R. Jördens, J. D. Jost, D. Kielpinski, K. Kim, A. B. Kish, E. Knill, Y. Kobayashi, J. C. J. Koelemeij, J. Labaziewicz, C. E. Langer, W. D. Lee, D. R. Leibbrandt, G. Leuchs, Y. Lin, L. Lorini, Y. Low, D. Lucas, R. Maiwald, K. S. McKay, A. M. Meier, V. Meyer, J. D. Miller, T. B. Mitchell, J. A. Mlynek, C. L. Myatt, A. S. Newbury, N. R. Newbury, C. W. Oates, W. H. Oskay, C. Ospelkaus, R. Ozeri, C. S. Pai, D. P. Pappas, T. E. Parker, D. E. Pritchard, R. J. Rafac, R. Reichie, H. O. Robinson, T. Rosenband, M. A. Rowe, S. A. Sackett, T. Schaetz, P. O. Schmidt, S. Seidelin, N. Shiga, R. E. Slusher, J. E. Stalnaker, D. Stick, J. Sterk, D. B. Sullivan, W. C. Swann, J. N. Tan, T. R. Tan, U. Tanaka, C. E. Tanner, M. J. Thorpe, Q. A. Turchette, T. Udem, H. Uys, A. P. van Devender, K. R. Vogel, F. L. Walls, U. Warring, J. H. Wesenberg, A. C. Wilson, Wieman, C. S. Wood, B. C. Young e W. H. Zurek), uma série de artigos (web science/Wineland DS) que tratam da Óptica Quântica, com ênfase no aprisionamento e na manipulação de íons objetivando a informação quântica. Para outros detalhes da vida e do trabalho científico de Wineland, indica-se ver sua *Nobel Lecture* (08/12/2012): Superposition, Entanglement, and Raising Schrödinger's Cat.