



Ciência e Sociedade

CBPF-CS-003/25

julho 2025

**Ano Internacional da Ciência e das Tecnologias Quânticas:
uma exposição**

Cássio Leite Vieira

Ano Internacional da Ciência e das Tecnologias Quânticas: uma exposição

International Year of Quantum Science and Technology: an exhibition

Cássio Leite Vieira

jornalista de ciências exatas

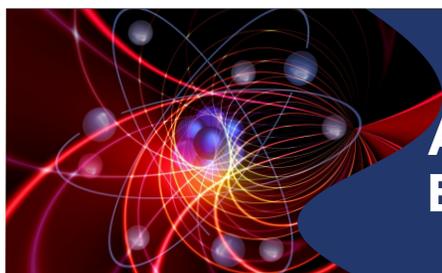
Submetido: 15/05/2025 Aceito: 15/07/2025

Resumo: Neste texto, elaborado para exposição sobre o Ano Internacional da Ciência e das Tecnologias Quânticas, apresentamos – em linguagem para o grande público – alguns dos principais desenvolvimentos dessas áreas, com ênfase no contexto histórico anterior e posterior à proposição da mecânica quântica matricial, há 100 anos.

Palavras chave: física; mecânica quântica; Ano Internacional da Ciência e das Tecnologias Quânticas; história da física; história da ciência; divulgação científica

Abstract: In this text, prepared for an exhibition celebrating the International Year of Quantum Science and Technology, we present – in language accessible to the general public – some of the main developments in these fields, with an emphasis on the historical context before and after the proposal of matrix quantum mechanics, 100 years ago

Keywords: physics; quantum mechanics; International Year of Quantum Science and Technology; history of Physics; history of science; scientific dissemination



ANO INTERNACIONAL DA CIÊNCIA E DAS TECNOLOGIAS QUÂNTICAS

100 ANOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

A Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (Unesco) declarou 2025 como Ano Internacional da Ciência e das Tecnologias Quânticas.

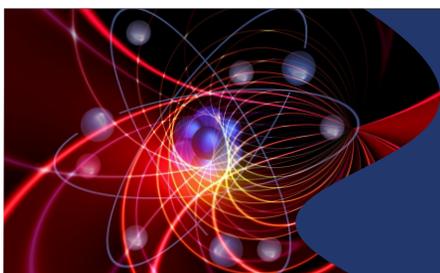
A efeméride comemora os 100 anos do nascimento da mecânica quântica, poderoso ferramental teórico voltado a entender e explicar fenômenos do diminuto universo das moléculas, dos átomos e das partículas subatômicas.

De lá até hoje, a mecânica quântica – considerada a teoria mais precisa da ciência – recebeu avanços importantes da física experimental. E os desdobramentos desses resultados permeiam nosso cotidiano, na forma de componentes eletrônicos, sensores, lasers, computadores, telefones celulares, microscópios, satélites, entre tantas outras tecnologias hoje indispensáveis.



Computador quântico da empresa IBM
Crédito: IBM

Esta exposição é iniciativa do Núcleo de Informação C&T e Biblioteca (NIB), do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), unidade de pesquisa do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), para marcar essa data tão importante no desenvolvimento do conhecimento científico.



LONGO CAMINHO

O progresso do conhecimento científico tem regra inviolável: está calcado em avanços teóricos ou experimentais anteriores. O desenvolvimento da mecânica quântica, em 1925, não é exceção: teve que percorrer longo caminho até sua concepção.

A física do fim do século 19, segundo o historiador da ciência canadense Erwin Hiebert (1919-2012), tinha as seguintes características: i) percepção crescente de uma unidade da física; ii) tentativas de união do muito pequeno com o muito grande; iii) postura mais relaxada em relação a especulações científicas; iv) aumento da colaboração entre grupos de pesquisa.

Esse programa, segundo Hiebert, foi posto em prática com base nas seguintes ferramentas: i) conservação de energia; ii) respeito à ordem dos elementos na Tabela Periódica; iii) culto às ideias sobre eletromagnetismo do físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879).

Foi nesse cenário que, ainda em 1900, o físico alemão Max Planck (1858-1947) chegou a resultado que deu início à chamada física quântica: na natureza, a energia é gerada e absorvida não de forma contínua – como se acreditava até então –, mas, sim, em pequenos 'pacotes' – mais tarde, batizados quanta (ou quantum, no singular).

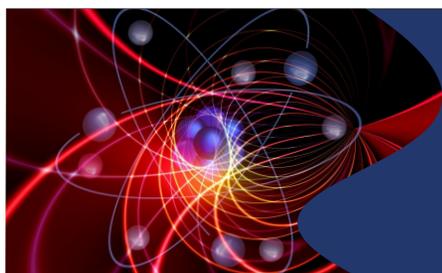
Relutante, Planck via essa conclusão – desdobramento de sua aceitação do atomismo, conceito ainda polêmico à época – como 'artifício' para entender fenômenos relativos à forma como a matéria responde ao calor.

É comum se dizer que esse resultado de Planck foi desdobramento de uma 'crise da física' (a chamada catástrofe ultravioleta). Mas, segundo o historiador da física dinamarquês Helge Kragh, ele se deu por um só motivo: o profundo conhecimento de Planck sobre a termodinâmica (estudo do calor).

Em 1905, o físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955), com base nesse conceito de Planck, chegou a conclusão revolucionária: a luz é formada por partículas – mais tarde, denominadas fótons.



Max Planck e Albert Einstein em 28 de junho de 1929
Crédito: SoCientifica's post



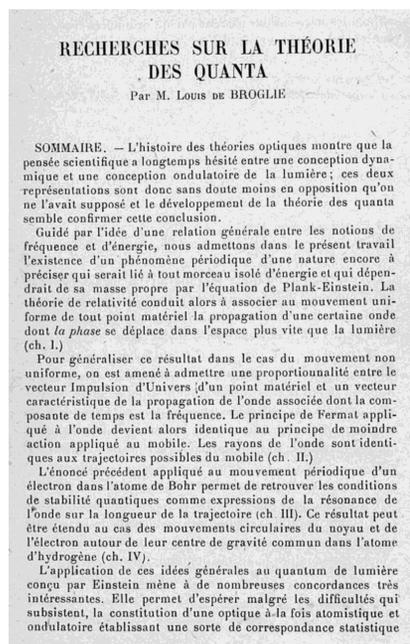
LONGO CAMINHO

À época, o conceito de fóton era visto com desconfiança – inclusive, por Planck. Mas Einstein nunca teve dúvidas sobre seu resultado. Ao longo da década de 1910 e início da seguinte, experimentos foram gradualmente mostrando a realidade física desse conceito.

Outros marcos da física quântica até 1925: i) o modelo atômico quântico do físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962), em 1913; ii) o desenvolvimento das bases teóricas da luz laser, por Einstein, em 1917; iii) o comportamento ondulatório das partículas (no caso, elétrons), pelo físico francês Louis de Broglie (1892-1987), em 1924.



Louis de Broglie
Crédito: Wikipedia

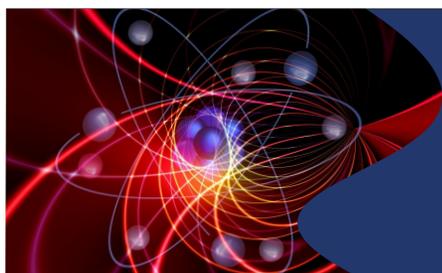


Tese de Louis de Broglie
Crédito: annphys.org

Esses e outros avanços formavam o cenário de fundo no qual foi idealizada a mecânica quântica.

Em um quadro histórico mais geral, a ciência, na então União Soviética, havia ganhado planejamento central; ocorreria maior percepção da profissão de cientista; laços entre C&T e militarismo se estreitariam; o governo passaria a ter interesse por política científica.

Essas são as bases do chamado 'modelo soviético de ciência', que influenciaria países como França, Reino Unido e EUA.



O NASCIMENTO DA MECÂNICA QUÂNTICA

O marco do Ano Internacional da Ciência e das Tecnologias Quânticas é a apresentação para publicação, em 29 de julho de 1925, da mecânica quântica matricial, pelo então jovem físico alemão Werner Heisenberg (1901-1976). Essa teoria foi desenvolvida a partir de conceito matemático denominado matrizes – tópico ensinado ainda no ensino médio.

Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen.

Von W. Heisenberg in Göttingen.
(Eingegangen am 29. Juli 1925.)

In der Arbeit soll versucht werden, Grundlagen zu gewinnen für eine quantentheoretische Mechanik, die ausschließlich auf Beziehungen zwischen prinzipiell beobachtbaren Größen basiert ist.

Bekanntlich läßt sich gegen die formalen Regeln, die allgemein in der Quantentheorie zur Berechnung beobachtbarer Größen (z. B. der Energie im Wasserstoffatom) benutzt werden, der schwerwiegende Einwand erheben, daß jene Rechenregeln als wesentlichen Bestandteil Beziehungen enthalten zwischen Größen, die scheinbar prinzipiell nicht beobachtet werden können (wie z. B. Ort, Umlaufzeit des Elektrons), daß also jenen Regeln offenbar jedes anschauliche physikalische Fundament mangelt, wenn man nicht immer noch an der Hoffnung festhalten will, daß jene bis jetzt un beobachtbaren Größen später vielleicht experimentell zugänglich gemacht werden könnten. Diese Hoffnung könnte als berechtigt angesehen werden, wenn die genannten Regeln in sich konsequent und auf einen bestimmt umgrenzten Bereich quantentheoretischer Probleme anwendbar wären. Die Erfahrung zeigt aber, daß sich nur das Wasserstoffatom und der Starkeffekt dieses Atoms jenen formalen Regeln der Quantentheorie fügen, daß aber schon beim Problem der „gekreuzten Felder“ (Wasserstoffatom in elektrischem und magnetischem Feld verschiedener Richtung) fundamentale Schwierigkeiten auftreten, daß die Reaktion der Atome auf periodisch wechselnde Felder sicherlich nicht durch die genannten Regeln beschrieben werden kann, und daß schließlich eine Ausdehnung der Quantenregeln auf die Behandlung der Atome mit mehreren Elektronen sich als unmöglich erwiesen hat. Es ist üblich geworden, dieses Versagen der quantentheoretischen Regeln, die ja wesentlich durch die Anwendung der klassischen Mechanik charakterisiert waren, als Abweichung von der klassischen Mechanik zu bezeichnen. Diese Bezeichnung kann aber wohl kaum als singemäß angesehen werden, wenn man bedenkt, daß schon die (ja ganz allgemein gültige) Einstein-Bohrsche Frequenzbedingung eine so völlige Absage an die klassische Mechanik oder besser, vom Standpunkt der Wellentheorie aus, an die dieser Mechanik zugrunde liegende Kinematik darstellt, daß auch bei den einfachsten quantentheoretischen Problemen an

Zeitschrift für Physik. Bd. XXXIII. 59

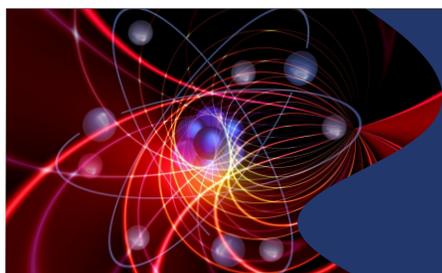


Página de artigo de Werner Heisenberg
Crédito: Zeitschrift für Physik, 1925

Werner Heisenberg
Crédito: Wikipedia

Apesar do destaque histórico dado a esse feito de Heisenberg, outros físicos à época contribuíram para essa teoria, como os alemães Max Born (1882-1970) e Pascual Jordan (1902-1980). Vale mencionar também os trabalhos do norte-americano Carl Eckart (1902-1973), bem como os das alemãs Lucy Mensing (1901-1995) e Hertha Sponer (1895-1968).

Em 1926, o físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961) apresentou versão ondulatória da mecânica quântica – no caso, baseada no comportamento ondulatório das partículas subatômicas desenvolvido, em 1924, por de Broglie.



O NASCIMENTO DA MECÂNICA QUÂNTICA

Em artigo de 1928, o físico britânico Paul Dirac (1902-1984) juntou conceitos da mecânica quântica e teoria da relatividade especial, de Einstein. Surgiu, assim, a mecânica quântica relativística, que explicava o comportamento relativístico (próximo à da velocidade da luz) dos elétrons.



Paul Dirac
Crédito: Wikipedia

The Quantum Theory of the Electron.

By P. A. M. DIRAC, St. John's College, Cambridge.

(Communicated by R. H. Fowler, F.R.S.—Received January 2, 1928.)

The new quantum mechanics, when applied to the problem of the structure of the atom with point-charge electrons, does not give results in agreement with experiment. The discrepancies consist of "duplexity" phenomena, the observed number of stationary states for an electron in an atom being twice the number given by the theory. To meet the difficulty, Goudsmit and Uhlenbeck have introduced the idea of an electron with a spin angular momentum of half a quantum and a magnetic moment of one Bohr magneton. This model for the electron has been fitted into the new mechanics by Pauli,* and Darwin,† working with an equivalent theory, has shown that it gives results in agreement with experiment for hydrogen-like spectra to the first order of accuracy.

The question remains as to why Nature should have chosen this particular model for the electron instead of being satisfied with the point-charge. One would like to find some incompleteness in the previous methods of applying quantum mechanics to the point-charge electron such that, when removed, the whole of the duplexity phenomena follow without arbitrary assumptions. In the present paper it is shown that this is the case, the incompleteness of the previous theories lying in their disagreement with relativity, or, alternatively, with the general transformation theory of quantum mechanics. It appears that the simplest Hamiltonian for a point-charge electron satisfying the requirements of both relativity and the general transformation theory leads to an explanation of all duplexity phenomena without further assumption. All the same there is a great deal of truth in the spinning electron model, at least as a first approximation. The most important failure of the model seems to be that the magnitude of the resultant orbital angular momentum of an electron moving in an orbit in a central field of force is not a constant, as the model leads one to expect.

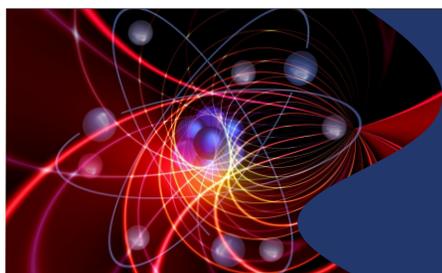
* Pauli, 'Z. f. Physik,' vol. 43, p. 601 (1927).

† Darwin, 'Roy. Soc. Proc.,' A, vol. 116, p. 227 (1927).

Página de artigo de Paul Dirac
Crédito: Royal Society of London, 1928

Nesta mesma década, desenvolveram-se os primeiros conceitos da chamada teoria quântica de campos – hoje, amplamente usada pelos físicos. Esse poderoso arcabouço teórico trata as partículas elementares como 'quanta' de campos – a exemplo do campo eletromagnético.

Assim, ao fim da década de 1920, os físicos tinham à disposição deles várias mecânicas. Além da quântica, somavam-se a esse cenário: i) a mecânica newtoniana, desenvolvida no século 17 e que lida com fenômenos de nosso dia a dia; ii) a mecânica relativística, alusão à teoria da relatividade, de Einstein, voltada para os efeitos da gravidade; iii) a mecânica estatística, que trata dos fenômenos coletivos da matéria.



TEORIA INCOMPLETA?

Na década de 1930, a mecânica quântica adentrou o mundo da física nuclear. A descoberta do nêutron, em 1932, é exemplo clássico nesse sentido. Três anos depois, outro avanço importante nessa área: o físico japonês Hideki Yukawa (1907-1981) propõe uma nova partícula (méson pi) como 'quantum' (ou 'carregador') da força nuclear forte.

O méson pi foi detectado, em 1947, em Bristol (Reino Unido), com participação decisiva do então jovem físico brasileiro César Lattes (1924-2005).

Nesse período, ganha fôlego debate filosófico – iniciado na década anterior – sobre a incompletude (ou não) da recém-formulada mecânica quântica.

Em 1935, Schrödinger apresentou seu famoso experimento mental, envolvendo um gato que, segundo as leis da mecânica quântica, poderia estar 'vivo' e 'morto' ao mesmo tempo. Mas o ponto alto desse debate se deu naquele mesmo ano: a publicação de artigo de Einstein e dois colaboradores, o russo Boris Podolsky (1896-1966) e o norte-americano Nathan Rosen (1909-1995).

Conhecido como paradoxo EPR (iniciais dos sobrenomes dos três autores), esse trabalho – apresentado também na forma de experimento mental – tentou mostrar que o emaranhamento – considerado o principal (e mais estranho) fenômeno do mundo quântico – violava a relatividade especial: informação poderia ser transmitida entre dois sistemas quânticos com velocidade superior à da luz no vácuo (300 mil km/s) – algo que essa teoria não permite.

MAY 15, 1935 PHYSICAL REVIEW VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*
(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

1.

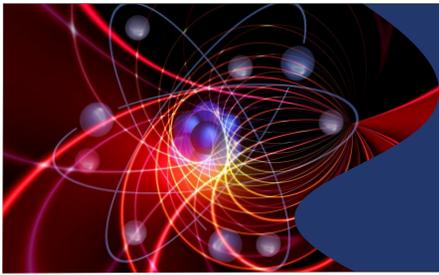
ANY serious consideration of a physical theory must take into account the distinction between the objective reality, which is independent of any theory, and the physical concepts with which the theory operates. These concepts are intended to correspond with the objective reality, and by means of these concepts we picture this reality to ourselves.

In attempting to judge the success of a physical theory, we may ask ourselves two questions: (1) "Is the theory correct?" and (2) "Is the description given by the theory complete?" It is only in the case in which positive answers may be given to both of these questions, that the concepts of the theory may be said to be satisfactory. The correctness of the theory is judged by the degree of agreement between the conclusions of the theory and human experience. This experience, which alone enables us to make inferences about reality, in physics takes the form of experiment and measurement. It is the second question that we wish to consider here, as applied to quantum mechanics.

Whatever the meaning assigned to the term *complete*, the following requirement for a complete theory seems to be a necessary one: every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory. We shall call this the condition of completeness. The second question is thus easily answered, as soon as we are able to decide what are the elements of the physical reality.

The elements of the physical reality cannot be determined by *a priori* philosophical considerations, but must be found by an appeal to results of experiments and measurements. A comprehensive definition of reality is, however, unnecessary for our purpose. We shall be satisfied with the following criterion, which we regard as reasonable. *If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity.* It seems to us that this criterion, while far from exhausting all possible ways of recognizing a physical reality, at least provides us with one

Página do artigo de Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen
Crédito: Physical Review



TEORIA INCOMPLETA?

Com isso, os três autores queriam mostrar que a mecânica quântica era incompleta. E, portanto, outra teoria deveria ser desenvolvida para entender aquela “fantasmagórica ação a distância” – ou seja, o emaranhamento, no qual dois ou mais sistemas quânticos agiriam como se fossem um só.

A resposta ao paradoxo veio de Bohr, ainda em 1935. Para o físico dinamarquês, não havia paradoxo: a natureza se comportava daquele modo. E pouco se poderia fazer a respeito.



Niels Bohr
Crédito: s.ebiografia.com

OCTOBER 15, 1935 PHYSICAL REVIEW VOLUME 48

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?

N. BOHR, *Institute for Theoretical Physics, University, Copenhagen*
(Received July 13, 1935)

It is shown that a certain "criterion of physical reality" formulated in a recent article with the above title by A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen contains an essential ambiguity when it is applied to quantum phenomena. In this connection a viewpoint termed "complementarity" is explained from which quantum-mechanical description of physical phenomena would seem to fulfill, within its scope, all rational demands of completeness.

IN a recent article¹ under the above title A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen have presented arguments which lead them to answer the question at issue in the negative. The trend of their argumentation, however, does not seem to me adequately to meet the actual situation with which we are faced in atomic physics. I shall therefore be glad to use this opportunity to explain in somewhat greater detail a general viewpoint, conveniently termed "complementarity," which I have indicated on various previous occasions,² and from which quantum mechanics within its scope would appear as a completely rational description of physical phenomena, such as we meet in atomic processes.

The extent to which an unambiguous meaning can be attributed to such an expression as "physical reality" cannot of course be deduced from a priori philosophical conceptions, but—as the authors of the article cited themselves emphasize—must be founded on a direct appeal to experiments and measurements. For this purpose they propose a "criterion of reality" formulated as follows: "If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity." By means of an interesting example, to which we shall return below, they next proceed to show that in quantum mechanics, just as in classical mechanics, it is possible under suitable conditions to predict the value of any given variable pertaining to the description of a mechanical system from measurements performed entirely on other systems which previously have been

interaction with the system under investigation. According to their criterion the authors therefore want to ascribe an element of reality to each of the quantities represented by such variables. Since, moreover, it is a well-known feature of the present formalism of quantum mechanics that it is never possible, in the description of the state of a mechanical system, to attach definite values to both of two canonically conjugate variables, they consequently deem this formalism to be incomplete, and express the belief that a more satisfactory theory can be developed.

Such an argumentation, however, would hardly seem suited to affect the soundness of quantum-mechanical description, which is based on a coherent mathematical formalism covering automatically any procedure of measurement like that indicated.* The apparent contradiction in

*The deductions contained in the article cited may in this respect be considered as an immediate consequence of the transformation theorems of quantum mechanics, which perhaps more than any other feature of the formalism contribute to secure its mathematical completeness and its rational correspondence with classical mechanics. In fact, it is always possible in the description of a mechanical system, consisting of two partial systems (1) and (2), interacting or not, to replace any two pairs of canonically conjugate variables (q_1, p_1) pertaining to systems (1) and (2), respectively, and satisfying the usual commutation rules

$$[q_1, p_1] = [q_2, p_2] = i\hbar, \quad [q_1, p_2] = [q_2, p_1] = 0,$$

by two pairs of new conjugate variables (Q, P) , (Q', P') related to the first variables by a simple orthogonal transformation, corresponding to a rotation of angle θ in the planes (q_1, p_1) and (q_2, p_2)

$$Q = Q_1 \cos \theta - Q_2 \sin \theta, \quad P = P_1 \cos \theta - P_2 \sin \theta \\ Q' = Q_1 \sin \theta + Q_2 \cos \theta, \quad P' = P_1 \sin \theta + P_2 \cos \theta.$$

Since these variables will satisfy analogous commutation rules, in particular

$$[Q, P] = [Q', P'] = i\hbar, \quad [Q, P'] = [Q', P] = 0,$$

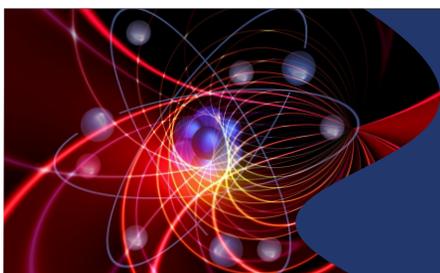
it follows that in the description of the state of the combined system definite numerical values may not be assigned to both Q and P , but that we may clearly assign

¹ A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).
² Cf. N. Bohr, *Atomic Theory and Description of Nature*, 1 (Cambridge, 1934).

Página de artigo de Niels Bohr
Crédito: Physical Review, 1935

O chamado debate Einstein-Bohr – classificado como o mais profundo da história da filosofia, segundo o físico e historiador da ciência Abraham Pais (1918-2000) – segue até hoje entre físicos e filósofos da ciência.

Historicamente, há tendência a se dar a 'vitória' a Bohr, cujas ideias sobre esse tema ficaram conhecidas como 'interpretação de Copenhague' da mecânica quântica.



NOVAS TEORIAS E RETOMADA DO DEBATE

Logo depois do fim da Segunda Guerra Mundial, a ciência (em especial, a física) sofreu grandes transformações nos EUA. Era a chamada Big Science: i) verbas estatais vertiginosas; ii) grandes laboratórios nacionais, com milhares de cientistas e administração centralizada e industrial; iii) conselhos de assessoramento; iv) aproximação entre ciência, indústria, estado e militarismo, formando o chamado Complexo Tecnológico Militar.



Artefato nuclear construído pelo Projeto Manhattan
Crédito: www.military.com

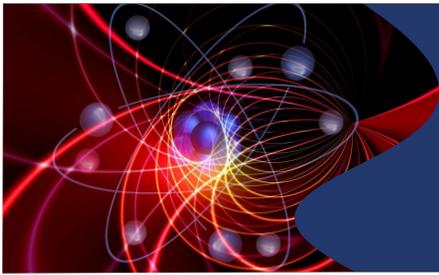
Essa soma de fatores originou o que o historiador da física russo Alexei Kojevnikov denomina 'Metafísica da Guerra Fria': conhecimento é sinônimo de poder (geopolítico, econômico e militar).

É nesse período que a eletrodinâmica quântica (EDQ) – teoria que trata da interação entre luz e matéria e tem o fóton como mediador ('carregador') da força eletromagnética – ganha sua versão final.

Os norte-americanos Richard Feynman (1918-1988) e Julian Schwinger (1918-1994), bem como o japonês Sin-itiro Tomonaga (1906-1979), ganhariam o Nobel de Física de 1965 pelo desenvolvimento da EDQ.



Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger e Richard P. Feynman
Crédito: Nobel Prize



NOVAS TEORIAS E RETOMADA DO DEBATE

Poucos anos depois, outros dois trunfos da mecânica quântica: i) a teoria eletrofraca, a união da força eletromagnética com a força nuclear fraca – esta última responsável por certos fenômenos radioativos; ii) a teoria cromodinâmica quântica, que lida com a força nuclear forte e explica, por exemplo, a estrutura de prótons e nêutrons.

Em meio a esses e outros avanços teóricos e experimentais, o debate sobre os fundamentos filosóficos da mecânica quântica ganharia força. Isso se deu com artigo, de 1964, do físico irlandês John S. Bell (1928-1990).



John S. Bell
Crédito: Wikipedia

Physics Vol. 1, No. 3, pp. 390-398, 1964 Physics Publishing Co. Printed in the United States

ON THE EINSTEIN-PODOLSKY-ROSEN PARADOX*

J. S. BELL†

Department of Physics, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin

(Received 4 November 1964)

I. Introduction

THE paradox of Einstein, Podolsky and Rosen [1] was advanced as an argument that quantum mechanics could not be a complete theory but should be supplemented by additional variables. These additional variables were to restore to the theory causality and locality [2]. In this sense that idea will be formalized mathematically and shown to be incompatible with the statistical predictions of quantum mechanics. It is the requirement of locality, or more precisely that the result of a measurement on one system be unaffected by operations on a distant system with which it has interacted in the past, that creates the essential difficulty. There have been attempts [3] to show that even without such a separability or locality requirement no "hidden variable" interpretation of quantum mechanics is possible. These attempts have been examined elsewhere [4] and found wanting. However, a hidden variable interpretation of elementary quantum theory [5] has been explicitly constructed. That particular interpretation has indeed a grossly non-local structure. This is characteristic, according to the result to be proved here, of any such theory which reproduces exactly the quantum mechanical predictions.

II. Formulation

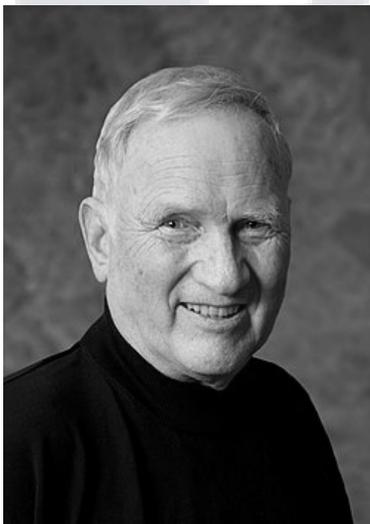
With the example advocated by Bohm and Aharonov [6], the EPR argument is the following. Consider a pair of spin- $\frac{1}{2}$ particles formed somehow in the singlet spin state and moving freely in opposite directions. Measurements can be made, say by Stern-Gerlach magnets, on selected components of the spins \hat{S}_1 and \hat{S}_2 . If measurement of the component \hat{S}_1 along the z axis yields the value $+\frac{1}{2}$ then, according to quantum mechanics, measurement of \hat{S}_2 must yield the value $-\frac{1}{2}$ and vice versa. Now we make the hypothesis [2] and it seems not at first worth considering, that if the two measurements are made at places remote from one another the orientation of one magnet does not influence the result obtained with the other. Since we can predict in advance the result of measuring any chosen component of \hat{S}_2 , by previously measuring the same component of \hat{S}_1 , it follows that the result of any such measurement must actually be predetermined. Since the initial quantum mechanical wave function does not determine the result of an individual measurement, this predetermination implies the possibility of a more complete specification of the state.

Let this more complete specification be effected by means of parameters λ . It is a matter of indifference in the following whether λ denotes a single variable or a set, or even a set of functions, and whether the variables are discrete or continuous. However, we write as if λ were a single continuous parameter. The result A of measuring \hat{S}_1 is then determined by \hat{S}_1 and λ , and the result B of measuring \hat{S}_2 is in the same instance determined by \hat{S}_2 and λ .

*Work supported in part by the U.S. Atomic Energy Commission

†On leave of absence from SLAC and CERN

Página de artigo de John S. Bell
Crédito: Physics 1, 1964

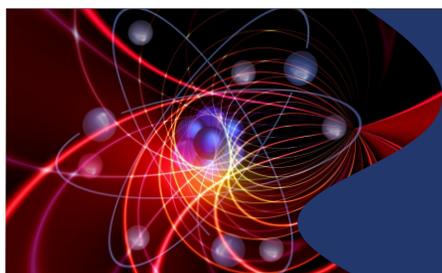


John Clauser
Crédito: Wikipedia

Em termos simples, o teorema de Bell – como ficou conhecido esse resultado – propõe teste sobre a possibilidade de informação ser transmitida de um local para outro instantaneamente – tecnicamente, esse fenômeno é denominado 'não-localidade'.

No início da década de 1970, testes experimentais do teorema de Bell – feitos por físicos ligados ao movimento da contracultura, como o norte-americano John Clauser – mostrariam que a natureza é 'não local', ou seja, sistemas emaranhados podem trocar informação (no caso, quântica) instantaneamente – isso respaldou a superioridade dos argumentos de Bohr em seu debate com Einstein.

Esses experimentos foram o alicerce de área hoje estratégica: informação quântica.

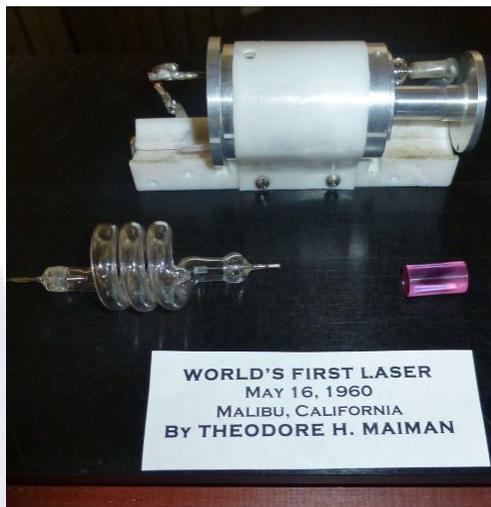


COMPUTAÇÃO, CRIPTOGRAFIA E CHIPS...

O transistor – componente eletrônico inventado em 1947 – foi uma das primeiras aplicações da mecânica quântica. Pouco mais de uma década depois, viria o laser, que poria em prática ideias apresentadas, cerca de 40 anos antes, por Einstein.



Primeiro transistor
Crédito: embarcados.com.br

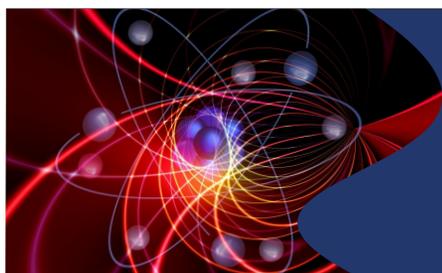


Primeiro laser
Crédito: www.heatsign.com

Desde então, a mecânica quântica possibilitou um sem-número de aplicações. Estimativas apontam que cerca de um terço do Produto Interno Bruto dos EUA tem origem em artefatos e serviços que são desdobramentos dessa teoria.

Um século depois da criação da mecânica quântica, quatro aplicações dessa teoria são protagonistas do que muitos veem como revolução não só científica, mas também geopolítica e econômica: computadores quânticos, criptografia quântica, bem como chips e sensores quânticos.

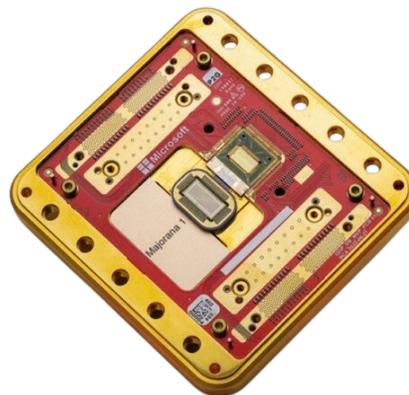
A área de informação quântica possibilitou tanto a idealização quanto a construção de computadores impensavelmente velozes, capazes de realizar – por vezes, em segundos – tarefas que levariam tempos astronômicos para os mais potentes equipamentos atuais.



COMPUTAÇÃO, CRIPTOGRAFIA E CHIPS...

Para isso, computadores quânticos se aproveitam basicamente de dois fenômenos do microuniverso subatômico: o emaranhamento e a superposição. Esta última permite que um bit de informação tenha, simultaneamente, valores 'zero' e 'um' – em computadores convencionais (clássicos), esses valores são excludentes, ou seja, são ou 'zero', ou 'um'.

Os chamados bits quânticos (ou q-bits) – ao estarem em estado de superposição e emaranhados entre si – dão a essas máquinas poder computacional gigantesco.

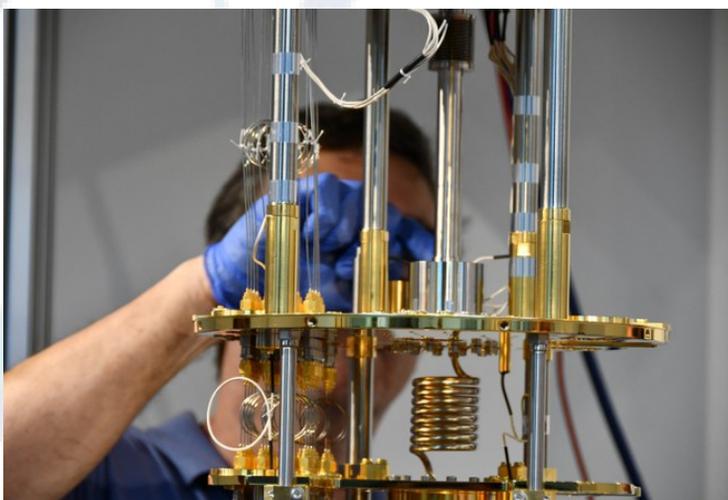


Majorana 1, primeiro processador quântico do mundo
Crédito: azure.microsoft.com

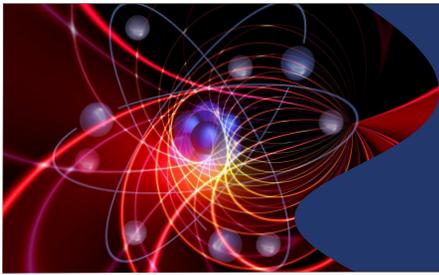
O emaranhamento está na base do desenvolvimento de um novo tipo de criptografia, a qual permite a transmissão de dados de forma inviolável. Isso, por sua vez, está levando à chamada internet quântica, que, além de veloz, seria (em teoria) à prova de *hackers*, por exemplo.

Tanto os computadores quânticos quanto a criptografia quântica já são realidade – apesar de ainda estarem em fase inicial de desenvolvimento. Essas e outras tecnologias quânticas são vistas como estratégicas nas próximas décadas, por questões ligadas, por exemplo, à segurança nacional.

No CBPF, a pesquisa nesses temas é feita pelo Grupo de Informação Quântica, que reúne teóricos e experimentais e que já deu início ao desenvolvimento de um chip quântico brasileiro, em seus laboratórios de ponta.



Refrigerador de diluição, equipamento que produz temperatura de 7 mK, necessária para operação do chip quântico
Crédito: Ana Gouveia | NCS/CBPF



AINDA MUITO A SE FAZER

As tecnologias ligadas à mecânica quântica, como o transistor e o *laser* – ditas de primeira geração –, estão presentes em nosso cotidiano há mais de meio século. Hoje, a faceta mais popular das aplicações (de segunda geração) dessa teoria é o computador quântico e seus chips quânticos, postos em prática por meio de iniciativas de grandes empresas e instituições governamentais.

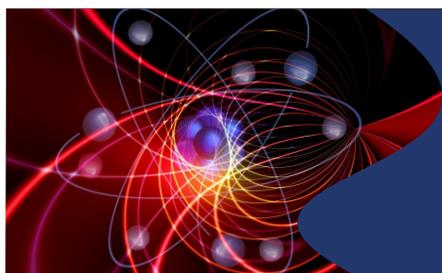
Para onde essas tecnologias vão direcionar a sociedade? Como todo exercício de futurologia, a resposta é incerta – afinal, como já foi dito, o futuro, criado por decisões cotidianas, é mais promessa do que certeza.

Mas não há como negar que a ciência e as tecnologias quânticas estão transformando o mundo atual. E muitas de suas promessas já são realidade, na forma de computadores, criptografia, transações bancárias, internet inviolável, comunicações, softwares, lasers, sensores, microscópios, semicondutores, litografia, metrologia, simulações computacionais, resolução de problemas complexos etc. – por vezes, tarefas já auxiliadas por inteligência artificial.



Estima-se que o mercado global para tecnologias quânticas atinja a casa de US\$ 2 trilhões na próxima década.

Nestes 100 anos da mecânica quântica – um dos alicerces da física contemporânea, ao lado da teoria da relatividade geral –, há muito a comemorar. E ainda muito a fazer. O objetivo é um só: um futuro que traga – como se espera – não só riqueza para as nações, mas também mais bem-estar e paz para a humanidade.



Bibliografia

DAHAN, R. Demythologizing quantum history. **Physics Today**, v. 78, n. 4, pp.38-43, 2025.

HIEBERT, E. The state of physics at the turn of the century. In: BUNGE, M.; SHEA, W. (eds.). **Rutherford and the physics at the turn of the century**. New York: Dawson and Science History Publications, pp. 3-22, 1979.

KOJEVNIKOV, A. **Stalin's great science: the times and adventures of Soviet physicists**. London: Imperial College Press, 2004.

KRAGH, H. Max Planck: the reluctant revolutionary, **Physics World**, v. 13, n. 12, p. 31, 2000.

KRAGH, H. **Quantum generations** – a history of physics in the twentieth century. Princeton: Princeton University Press, 2002.

OLIVEIRA, I. dos S.; VIEIRA, C. L. **A revolução dos q-bits: o admirável mundo da computação quântica**. Rio de Janeiro: Editora Zahar, 2009.

OLIVEIRA, I. dos S. Ano Internacional da Ciência e Tecnologias Quânticas. Podemos comemorar? **Ciência e Cultura** (online). Disponível em: <https://revistacienciaecultura.org.br/?artigos=ano-internacional-da-ciencia-e-tecnologia-quanticas-podemos-comemorar>

VIEIRA, C. L.; VIDEIRA, A. A. P. Carried by history – Cesar Lattes, nuclear emulsions, and the discovery of the pi meson. **Physics in Perspective**, v. 16, n. 1, pp.3-36, 2014.

Presidente da República

Luiz Inácio Lula da Silva

Ministra de Estado de Ciência, Tecnologia e Inovação

Luciana Santos

Diretor CBPF

Márcio Portes de Albuquerque

Diretor substituto do CBPF

João Paulo Sinnecker

Coordenador do NIB/CBPF

Nilton Alves Júnior

Curadoria da exposição

Valéria Fortaleza

Agradecimentos

Antonio Augusto Passos Videira (UERJ/CBPF), Ivan dos Santos Oliveira (CBPF) e Zzero Comunicação



CBPF



Pedidos de cópias desta publicação devem ser enviados aos autores ou ao:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Área de Publicações
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4^o andar
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ
Brasil
E-mail: alinecd@cbpf.br/valeria@cbpf.br
<http://revistas.cbpf.br/index.php/CS>

Requests for copies of these reports should be addressed to:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Área de Publicações
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4^o andar
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ
Brazil
E-mail: alinecd@cbpf.br/valeria@cbpf.br
<http://revistas.cbpf.br/index.php/CS>