Parte I - História da teoria quântica – desenvolvimentos e fundamentos

Problemas de pesquisa na história da mecânica quântica

Joan Lisa Bromberg

SciELO Books / SciELO Livros / SciELO Libros

FREIRE JR, O., PESSOA JR, O., and BROMBERG, JL., orgs. *Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais* [online]. Campina Grande: EDUEPB; São Paulo: Livraria da Física, 2011. 456 p. ISBN 978-85-7879-060-8. Available from SciELO Books <<http://books.scielo.org>>.

All the contents of this work, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported.

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença Creative Commons Atribuição - Uso Não Comercial - Partilha nos Mesmos Termos 3.0 Não adaptada.

Todo el contenido de esta obra, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported.

Parte I

História da Teoria Quântica – desenvolvimentos e fundamentos

Problemas de pesquisa na história da Mecânica Quântica¹

Joan Lisa Bromberg

Uma questão surgiu no final de um artigo que publiquei em 2008 na *Historical Studies in the Natural Sciences*. Nele, dissera algo como o seguinte: nos anos finais do último século e na primeira década deste, os físicos realizaram mais e mais experimentos sobre a filosofia da mecânica quântica. Entre os conceitos que eles testaram estavam a ideia da complementaridade de Niels Bohr e a natureza da fronteira entre o mundo microscópico, que as leis não-intuitivas da mecânica quântica parecem governar, e o mundo sensível da nossa experiência cotidiana.

Os físicos que descrevem esses experimentos têm feito muitas afirmações sobre eles. Uma delas é de que eles lançaram uma nova luz sobre o significado da mecânica quântica. A outra é que eles abriram o caminho para testar os limites da validade dessa teoria. Eis alguns exemplos: em 1984, o presidente do comitê organizador de uma conferência, cujo título era revelador - International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology, fez a seguinte declaração:

Apesar do sucesso inquestionável da mecânica quântica [...] as controvérsias relacionadas à sua interpretação nunca deixaram de existir [...] mas os argumentos têm sido baseados principalmente em experimentos de pensamento idealizados e que, deste modo, dificilmente atraíram a atenção de muitos físicos os quais estavam ocupados com os seus próprios problemas mais realistas. Os recentes desenvolvimentos na tecnologia, contudo, tornaram possível a realização de muitos desses experimentos de pensamento nos laboratórios. [...] Na organização [desta conferência], nós pretendemos tirar

1 Tradução de Indianara Lima Silva e revisão técnica de Olival Freire Jr.

completa vantagem deste avanço tecnológico, e emitir uma nova luz sobre aquelas velhas questões, mas, fundamentais da mecânica quântica. (NAKAJIMA, 1984)

A seguir, está uma declaração de 1992:

Na década de 1980, a tecnologia finalmente tornou possível chegar aos conceitos de medição de Bohr, von Neumann e seus colegas da década de 1930, e forçou os físicos modernos a elaborarem e estenderem aqueles conceitos. (THOME, 1992, p. xiv)

Em 1995, afirmou-se que

Nos anos recentes, surgiu um crescimento explosivo nas novas técnicas experimentais as quais podem ser adaptadas para testar algumas das previsões mais estranhas da teoria quântica [...] trazendo-nos dias mais próximos de determinar os limites dessa teoria. (GREENBERGER, 1995, p. xiii-xiv)

Por fim, uma declaração feita em 2005, traduzida de um livro publicado em 1997:

Nos anos recentes, o debate sobre as questões mais relevantes da teoria moveu-se para um nível mais alto. O nosso entendimento das implicações do formalismo foi modificado devido, em particular, a algumas inovações tecnológicas importantes que tornaram possíveis muitos novos experimentos em nossos laboratórios. (GHIRARDI, 2005, p. xiv)

Eu desejei, então, testar essas afirmações. Como a condução de experimentos reais nas décadas de 1970, 1980 e 1990 afetou o que os físicos e os filósofos tinham a dizer sobre o significado da mecânica quântica? Obviamente, os experimentos de Bell tinham tido um impacto extraordinário. Mas e os experimentos realizados com os instrumentos mais recentes?

Eu me questionei se um modo de investigar sobre isso seria a partir da análise de um grupo particular de instrumentos. Nós poderíamos, por exemplo, examinar os avanços tecnológicos que os tornaram possíveis, os experimentos realizados com eles e a forma pela qual os seus resultados foram utilizados nos argumentos sobre as interpretações da mecânica quântica.

Os instrumentos escolhidos foram as cavidades de microondas, conhecidas, às vezes, como *micromasers*, originadas a partir da tecnologia de *masers* e *lasers*. Eles têm sido utilizados para examinar a complementaridade de Bohr e a fronteira clássico-quântica. Os *micromasers* têm demonstrado com sucesso a granularidade ou a natureza quântica da luz. Outros tipos de equipamento também

foram utilizados para testar esses mesmos princípios filosóficos. E havia a estimulação mútua entre os grupos que os utilizavam e os que trabalhavam com os *micromasers*. No entanto, eu pensei que talvez pudéssemos compreender aquelas questões, seguindo o caminho de um tipo singular de instrumento. Comecei, então, a analisar a história dos *micromasers*. Ao fazê-lo, outras questões históricas interessantes começaram a surgir. Utilizarei este texto para discutir sobre a história do *micromaser*, mas, também, traçarei essas questões, sugerindo-as como problemas de pesquisa.

A narrativa do *micromaser* inicia-se com a invenção de novos tipos de *lasers* na década de 1960. Eles são os assim chamados *lasers sintonizáveis*. Os primeiros *lasers* tinham produzido luz em uma ou mais frequências fixas. Esses novos *lasers* poderiam ser sintonizados em uma faixa de frequências. Na metade da década de 1970, eles tornaram possíveis novos campos de espectroscopia. Entre eles estava a espectroscopia dos átomos de Rydberg. Esses átomos possuem um alto número quântico principal, isto é, são átomos cujo elétron da camada exterior, da valência, está tão distante do núcleo que eles se assemelham aos átomos de hidrogênio. Os átomos de Rydberg, no espaço interestelar, foram observados pelos radioastrônomos na década de 1960. Contudo, como esses átomos eram muito difíceis de fazer em laboratório através dos métodos disponíveis, os átomos terrestres de Rydberg não foram muito estudados.

Mas, a partir dos *lasers* sintonizáveis, isso mudou. Eles provocaram uma explosão de pesquisa sobre os átomos de Rydberg. Os editores do volume *Rydberg states of atoms and molecules*, publicado em 1983, puderam escrever no prefácio que

[...] mais da metade dos trabalhos publicados neste campo tem aparecido após 1975. [...] Do ponto de vista do experimentalista, [...] o campo permaneceria essencialmente adormecido até a chegada do *laser* sintonizável". (STEBBINGS; DUNNING, 1983, p. ix)

Uma propriedade que diferencia os átomos de Rydberg dos seus primos em estados de menor energia é o forte efeito que os campos elétricos externos exercem sobre eles. Para os estados de menor energia, a força de Coulomb dos núcleos muito próximos é mais forte do que qualquer campo que os cientistas podem criar no laboratório. Para os átomos de Rydberg, os núcleos e os outros elétrons estão bem distantes. Isso torna possível examinar experimentalmente o modo pelo qual os campos de laboratório afetam o comportamento atômico. Essa era uma área que um grupo do MIT, sob a liderança de Daniel Kleppner, especialmente investigava.²

2 Ver, por exemplo, o artigo: Ducas e outros (1975). Ver também: Kleppner e colaboradores (1983, p. 73-116).

Essa mesma propriedade dos átomos de Rydberg também resolveu uma difícil questão experimental. Como os átomos de Rydberg também são altamente estáveis quanto ao decaimento radiativo, o velho método para determinar o nível de energia de um átomo, através da medição do comprimento de onda da sua radiação, não podia ser usado. No MIT, e através dos trabalhos do grupo de Kleppner, “o campo de ionização” tornou-se a técnica preferida. Quanto maior a energia do átomo, menor é o campo externo que é preciso para ionizá-lo. A intensidade do campo de ionização tornou-se a medida da energia do átomo, a qual era uma medida elegante, simples e extremamente sensível. Neste caso, “Um átomo único de Rydberg em um estado bem definido pode ser detectado dessa forma” (FABRE; HAROCHE, 1983, p. 136). Isso é um exemplo impressionante de como um novo instrumento – o *laser* sintonizável – pôde tornar possível o estudo de uma nova classe de objetos – os átomos de Rydberg – e como, por sua vez, as propriedades desse objeto podem tornar possíveis outras novas instrumentações.

As pessoas que trabalharam com os átomos de Rydberg também conheciam as cavidades de microondas. Daniel Kleppner, por exemplo, foi um dos inventores do *maser* de hidrogênio. Os *masers* funcionam enviando moléculas ou átomos excitados para cavidades de microondas. O conhecimento profundo das cavidades, necessário para trazer a existência do *maser* de hidrogênio, incluiu a estrutura dos modos magnéticos que formam a cavidade, os meios de sintonizar a frequência desses modos, as propriedades mecânicas das cavidades, bem como as suas propriedades térmicas e magnéticas. (KLEPPNER et al., 1965)

Os outros dois homens que são fundamentais para essa narrativa tinham experiência com as cavidades de *laser*: Herbert Walther, da Alemanha, e Serge Haroche, da França. Walther nasceu em 1935, obteve o seu doutorado em Heidelberg, em 1962, e a sua *Habilitation* em Hannover, em 1968. Um das suas posições de pós-doutorado foi na Universidade do Colorado e, nessa posição, contribuiu para a invenção de uma versão inicial do *laser* sintonizável de corante (WALTHER; HALL, 1970). Na década de 1970, tornou-se um dos líderes na pesquisa com espectroscopia do *laser*, primeiro como professor na Universidade de Colônia e, em 1975, com uma posição na Universidade de Munique. (HERMANN; LECHNER, 2006)

Serge Haroche nasceu no Marrocos em 1944. Obteve o seu doutorado em 1971 na École Normale Supérieure em Paris, onde estudou com Alfred Kastler e Jean Brossel, entre outros. O orientador da sua tese foi Claude Cohen-Tannoudji. De Paris, Haroche foi realizar um pós-doutorado na Universidade de Stanford, na Califórnia, sob a orientação de Arthur Schawlow, um dos inventores do *laser*. Os *lasers* de corante também foram desenvolvidos em Standford e Haroche tornou-se um dos primeiros a aplicar essa nova ferramenta na espectroscopia (HAROCHE et al., 1973; HAROCHE, 2004). Depois, Haroche retornou a École Normale Supérieure, trazendo consigo o *laser* como parte do seu *kit* de ferramentas.

Os primeiros *masers* funcionavam com aproximadamente um bilhão de moléculas de amônia em uma cavidade de microondas. De fato, obter um fluxo grande o suficiente de moléculas foi um dos obstáculos que os homens que construíram esses *masers* tiveram de superar (BROMBERG, 1991). No entanto, os átomos de Rydberg têm a propriedade de se acoplar muito mais fortemente com microondas do que as moléculas de amônia. Então, um *maser*, utilizando os átomos de Rydberg como a substância de trabalho, deveria precisar de um fluxo muito menor.

Haroche e os seus colegas produziram exatamente esse *maser* no final da década de 1970. O *maser* tinha apenas aproximadamente 500 átomos fluindo através da cavidade (GROSS et al., 1979). Eles mencionaram que o *maser* poderia ser utilizado na espectroscopia dos átomos de Rydberg e nos detectores sensíveis da radiação de microonda. No entanto, também é evidente o desejo de produzir um *maser* com ainda menos átomos. Logo, no início da década de 1980, o objetivo de obter um *maser* de átomo único estava claramente enunciado (HAROCHE et al., 1982, p. 659, 670-671). Deste modo, há uma década de competição entre o grupo de Walther, na região de Munique, e o grupo de Haroche em Paris. Passos na direção de um *maser* de átomo único se alternaram entre eles.

Antes de iniciar essa discussão, eu gostaria de sugerir um primeiro tópico de investigação, que seria um estudo comparativo desses dois grupos. Haroche e Walther trabalharam em instituições diferentes. De um lado, Walther ajudou a fundar o Max Planck Institute for Quantum Optics em Garching, próximo a Munique. Ele foi seu codiretor a partir de 1981, quando o instituto tomou forma. Do outro lado, Haroche construiu um grupo que estava dentro da École Normale e estava baseado em seus estudantes de pós-graduação.

Os equipamentos dos dois grupos também eram diferentes. Neste sentido, seria interessante investigar quais as tradições e as competências que estavam incorporadas no equipamento? Como as diferenças nos equipamentos influenciaram as diferentes direções que as suas pesquisas tomaram? Poderemos aprender mais sobre a pesquisa europeia nesta década, a partir de tal estudo? Os padrões de financiamento para a ciência na França e na Alemanha os afetaram diferentemente? E o financiamento internacional? Tanto Paris quanto Garching atraíram físicos estrangeiros. Havia diferenças na forma como esses dois locais funcionavam na condição de centros internacionais?

Como eu havia mencionado, o progresso para o *maser* de um átomo único alternou idas e vindas entre o grupos de Paris e o de Garching. Talvez a mais importante melhoria tecnológica tenha sido o aumento na “qualidade” da cavidade do *maser*, ou seja, na sua capacidade em conservar a energia eletromagnética. Os artigos do grupo da École Normale Supérieure mostraram, com riqueza de detalhes, o seu passo a passo para a melhoria da qualidade da cavidade. Em

um artigo recebido pela *Physical Review*, em março de 1982, o grupo utilizou as cavidades abertas de bronze, em temperatura ambiente. Os pulsos de *maser* de poucas centenas de nanossegundos foram obtidos com aproximadamente 10 mil átomos de Rydberg dentro da cavidade (MOI et al., 1983). No ano seguinte, Haroche e os seus colaboradores tinham construído uma cavidade com uma qualidade aproximadamente 30 vezes maior, mudando o nióbio supercondutor e operando abaixo de 6 graus Kelvin. Ao mesmo tempo, foram capazes de aumentar o fluxo dos átomos de Rydberg para um ponto em que apenas um deles atravessava a cavidade de cada vez. Mas a qualidade da sua cavidade ainda não era boa o suficiente para obter mais do que uma ação do *maser* transiente. (GOY et al., 1983)

Em seguida, Garching obteve o próximo êxito. Em artigo recebido pela *Physical Review Letters* em agosto de 1984, os experimentadores descreveram uma qualidade de cavidade de 10 a 100 vezes maior do que aquela do grupo de Paris. A sua cavidade também foi construída a partir do nióbio supercondutor, meticulosamente processada, e eles foram capazes de realizar o experimento entre 4.3 e 2 graus Kelvin. A operação contínua do *maser*, com não mais do que um átomo de cada vez, foi demonstrada e, embora eles ainda não pudessem mapeá-la, as condições estavam corretas para o átomo e para o campo, de modo a lançar um fóton para frente e para trás entre si de 5 a 20 vezes. (MESCHEDE; WALTHER; MUELLER, 1985)

O grupo de Paris iria finalmente demonstrar essa oscilação. E eles mostrariam, utilizando os campos de cavidade muito fracos, que essa oscilação revelaria a granularidade ou a natureza quântica, da luz (BRUNE et al., 1996). Ao mesmo tempo, esse grupo estava construindo e analisando um tipo diferente de *maser* de átomo único, a partir do qual o átomo realizava uma transição de um nível para o outro, emitindo um par de fótons ao invés de um fóton único (BRUNE et al., 1987; BRUNE; RAIMOND; HAROCHE, 1987; DAVIDOVICH et al., 1987).

Outra sugestão para um projeto em História. Poderíamos relacionar o progresso técnico que conduziu a esses resultados ao mundo mais largo do avanço tecnológico? Eu gostaria de mencionar a observação feita por Peter Galison, em *Image and logic*, que a instrumentação científica faz parte de um *continuum* de tecnologia utilizada em todo o espectro da atividade humana. (GALISON, 1997) Logo, a instrumentação acrescenta pouco valor se nós, historiadores, somente escrevermos sobre as melhorias sucessivas dos aparelhos como as cavidades. Os próprios físicos fornecem tais histórias em seus artigos de revisão. Contudo, podemos dar uma real contribuição se conseguirmos relacionar os avanços na Física com as mudanças tecnológicas em todas as ciências, bem como com as aplicações comerciais e militares.

Mas, voltemos à narrativa. Os resultados experimentais dos *micromasers* não foram uma surpresa. Em meados da década de 1980, os teóricos estiveram calculando as interações entre os átomos únicos e os modos dos campos singulares por mais de duas décadas. Os cálculos originais, contudo, tinham sido realizados por razões bem distantes de comparações experimentais.

Um dos primeiros tratamentos, e um que viria a ser citado universalmente, foi publicado em 1963 pelo físico Edwin T. Jaynes, da Universidade de Washington, e pelo seu estudante Frederick W. Cummings. Jaynes estava insatisfeito com a Teoria Quântica do Eletromagnetismo (do acrônimo “QED”, em inglês, ou eletrodinâmica quântica) em um nível mais fundamental. Antes da II Guerra Mundial, a QED tinha sido atormentada pelos cálculos que conduziam a respostas infinitas. Na década de 1940 e na de 1950, esse problema foi resolvido pelo programa de renormalização, o qual eliminou as infinitudes pela subtração de outras infinitudes. Jaynes não gostava da renormalização. Ele procurou, portanto, mostrar que o *maser* da molécula de amônia em operação poderia ser igualmente bem tratado por uma teoria que tratasse as moléculas pela mecânica quântica, mas que, ao invés de quantizar os campos tratasse os mesmos pela teoria eletromagnética clássica. Jaynes estendeu esse tratamento semiclássico e denominou a sua abordagem embelezada de Teoria Neoclássica (NCT, em inglês).

A estratégia do artigo de Jaynes-Cummings foi tratar primeiramente pela QED uma molécula única de amônia, em interação com um modo eletromagnético singular em uma cavidade idealizada sem perda. Em seguida, eles generalizaram o tratamento para o caso de muitas moléculas. Depois, eles realizaram uma análise neoclássica e compararam as suas previsões com a eletrodinâmica quântica. Eles escreveram:

A teoria semiclássica, quando estendida [...] reproduz quase quantitativamente a mesma lei das trocas de energia e as propriedades de coerência como a teoria do campo quantizado. (JAYNES; CUMMINGS, 1963, p. 90)

Tendo mostrado que a NCT “[...] explica os efeitos, que todos os livros-textos padrões, descrevem como necessitando de uma quantização do campo para a sua explicação”, eles dedicaram o final do seu artigo a uma aplicação da NCT para o *maser* de amônia. (JAYNES; CUMMINGS, 1963, p. 101-102)

Novamente, eu gostaria de fazer uma pausa para propor outro tópico de investigação. A História da Eletrodinâmica Quântica dentro da Óptica poderia nos dar uma oportunidade de unir as narrativas de duas disciplinas que são geralmente tratadas separadamente. A tentativa de Jaynes de evitar a utilização da QED seria certamente parte de tal história. Assim também seria o caso quando, no início da

década de 1960, Roy J. Glauber invadiu a Óptica para insistir que os tratamentos clássicos da coerência fossem reformulados de acordo com a Teoria Quântica de campo. “Em última instância, não há substituto para a teoria quântica na descrição dos quanta” (GLAUBER, 1963, p. 85). E essa história poderia examinar a forma pela qual os ópticos quânticos navegaram entre o cálculo semiclássico e o quântico através do resto do século, e se poderia perguntar sobre qual o impacto dos experimentos ópticos das décadas de 1980 e 1990, os quais revelaram a granularidade da luz.

É uma das ironias da História que o modelo neoclássico de Jaynes-Cummings não tenha sido adotado. Ao invés disso, os teóricos abraçaram e exploraram, ao longo dos anos 60 e 70, as equações da Eletrodinâmica Quântica de Jaynes e Cummings.³ Mas, o que eu quero enfatizar é que este modelo da QED despertou a atenção por ser um problema que poderia ser resolvido exatamente e não por ele ser relevante para o trabalho experimental.⁴

Com o início da década de 1980, contudo, algo novo aconteceu. Uma aproximação iniciou-se entre essa tradição teórica e o *micromaser*. Os teóricos começaram a realizar cálculos diretamente relacionados com o trabalho experimental. Um exemplo é a pesquisa de Joseph Eberly e do seu grupo da Universidade de Rochester, nos Estados Unidos. Antes de 1980, partindo do modelo totalmente quantizado de Jaynes-Cummings, eles tinham derivado um resultado importante. Após 1981, Eberly tornou-se um visitante frequente de Garching e o seu grupo começou a realizar cálculos das condições experimentais por meio dos quais os fenômenos que eles calcularam poderiam ser exibidos⁵.

Com o avanço da década de 1980 e com o *micromaser* tornando-se uma realidade, os teóricos seguiram novos rumos. Eles trabalharam em teorias do novo instrumento⁶, explorando, assim, as diferenças entre os sistemas que eram compostos por muitos átomos e os que faziam a utilização de átomos únicos. Por exemplo, eles perguntaram: - Quais eram as novas ferramentas teóricas que deveriam ser introduzidas para tratar as situações de átomo único (MEYSTRE, 1992) e sobre quais eram os novos fenômenos que poderiam ser esperados a partir deles?

3 Uma história desses artigos subsequentes é dada na primeira seção do artigo: Narozhny, Sanchez-Mondragon e Eberly (1981).

4 Ver, por exemplo, o tratamento desse modelo no seguinte artigo: Allen e Eberly (1975).

5 Compare o artigo de Eberly e outros (1980), com a seção 8, *Experimental Prospects*, do artigo: Yoo e Eberly (1985).

6 Por exemplo, ver o artigo: Filipowicz, Javanainen e Meystre (1986).

Os teóricos também começaram a sugerir novos usos para o *micromaser*. Um exemplo de especial importância para esse trabalho foi a ideia de Marlan O. Scully de utilizar os *micromasers* para esclarecer a natureza da complementaridade de Niels Bohr. Mesmo antes do *micromaser*, Scully já tinha argumentado que a complementaridade era um princípio mais geral do que as relações de incerteza de Heisenberg (BROMBERG, 2006; CANTRELL; SCULLY, 1978; SCULLY; SHEA; MCCULLEN, 1978). Para o caso do experimento da dupla fenda, por exemplo, a complementaridade entre a informação sobre qual o caminho e sobre a interferência é frequentemente explicada sob a base das relações de incerteza. No famoso exemplo de Richard Feynman, a informação sobre qual o caminho da passagem de um elétron através de uma dupla fenda é obtida por uma fonte de luz que produz um espalhamento dos fótons pelo elétron. Essa informação da posição, no entanto, é apenas obtida através da criação da incerteza no *momentum*, assim, o fóton fornece ao elétron um recuo que altera o seu *momentum* e borra o padrão de interferência (FEYNMAN, 1963). Scully argumentou que os mecanismos baseados na incerteza eram uma forma de manter a complementaridade assegurada, mas não a única. No início de 1978 e trabalhando com vários colaboradores, ele elaborou uma série de experimentos de pensamento no qual a informação sobre o caminho era registrada pelos detectores que não perturbavam a partícula, cuja trajetória eles determinaram.⁷

Uma vez que o *micromaser* estava em operação, Scully, junto com Herbert Walther e Berthold-Georg Englert, transferiu essas ideias para o experimento com o *micromaser*. As partículas que emergiam das fendas eram átomos de Rydberg. Dois *micromasers* foram inseridos antes das fendas. O aparato foi ajustado de modo que um átomo tivesse probabilidade igual a um para emitir um fóton quando ele passasse através da cavidade. Se um fóton extra aparecesse na cavidade 1, portanto, poderíamos saber que o átomo passou através da fenda 1. Scully e os seus colaboradores sustentaram que essa informação seria obtida sem a perturbação do átomo.

Nós temos encontrado um modo [...] de determinar a informação sobre qual o caminho ou tipo de partícula sem o espalhamento ou, de outro modo, introduzindo fatores de fase largamente incontroláveis nos feixes que interferiam. Para ser claro, nós encontramos franjas de interferência que desapareceram à medida que temos a informação sobre qual o caminho, mas nós concluímos que esse desaparecimento origina-se das correlações entre o aparato de medição e o sistema que está sendo observado. O princípio da complementaridade está demonstrado, embora que a relação de incerteza da posição não desempenhe nenhum papel. (SCULLY; ENGLERT; WALTHER, 1991, p.111)

7 De modo mais proeminente, no seguinte artigo: Scully e Druehl (1982).

Logo, os experimentos de pensamento com o *micromaser* focalizaram a atenção nas relações entre a complementaridade, a incerteza e as correlações (ou emaranhamentos) entre os sistemas.

Neste período, as superposições macroscópicas tornaram-se um tópico com bastante destaque. Elas são os famosos estados do gato de Schrödinger. A questão é saber se, da mesma forma que os átomos podem estar em uma superposição de dois estados diferentes, um objeto macroscópico como um gato pode estar em uma superposição, por exemplo, o estado de estar morto ou o estado de estar vivo. O grupo da École Normale Supérieure passou a estudar as superposições macroscópicas no início da década de 1990. Inicialmente, eles analisaram como criar superposições coerentes de campos eletromagnéticos dentro de uma cavidade; depois, eles passaram a se perguntar como essas superposições decaíam ou “decohere”.⁸ A descoerência está associada à relação entre o mundo quântico e o clássico. Ela também tem relações profundas com outros aspectos da filosofia da mecânica quântica, como as ideias sobre a complementaridade propostas por Scully e os seus colaboradores. Por outro lado, a descoerência também está relacionada à computação quântica e à questão de se esse projeto de tecnologia será viável ou não. O grupo de Paris examinava a questão tanto em termos científicos, quanto tecnológicos.

O grupo debruçou-se no problema das superposições macroscópicas através do trabalho com os chamados métodos de “não-demolição” para a medição da intensidade do campo da cavidade. A maioria dos métodos de medição da intensidade do campo destrói alguns dos fótons do campo. Por exemplo, um fotomultiplicador absorve um fóton para liberar uma cascata de elétrons, a qual testemunhava a existência anterior do fóton. Os métodos de não-demolição conservam o número total de fótons do campo.

Para realizar tal medida, o grupo propôs afastar-se da situação na qual a frequência da cavidade é ressonante com a frequência da transição dos átomos de Rydberg e, assim, considerar uma interação não ressonante entre o átomo e a cavidade. Desde que ressonante significa que o átomo não pode mais trocar um fóton com o campo, essas interações conservam o número de fótons. Contudo, esses cálculos mostravam que a interação afetava, de fato, a fase do campo. Em um caso particular, no qual todos os átomos que entram com sucesso na cavidade têm a mesma velocidade, o campo deveria desenvolver uma superposição coerente de estados com fases diferentes. (BRUNE et al., 1992)

8 Dois campos eletromagnéticos são coerentes se, quando combinados, produzirem efeitos de interferência. Mais detalhes, ver Wolf (2007). NT: Em português, temos o substantivo descoerência, mas não há um verbo para descrever a perda da coerência.

A criação real dessas superposições macroscópicas, “gatos de fases”, durou alguns anos. Um número de avanços tecnológicos possibilitou a sua realização. E um deles foi criogênico. O grupo conseguiu resfriar essa cavidade para um valor abaixo de 0.6 graus Kelvin. Ademais, o controle das superfícies internas da sua cavidade desempenhou um papel. (HAROCHE; RAIMOND, 2006)

O grupo de Paris também tinha desenvolvido uma técnica, a qual enviava todos os átomos para a cavidade com a mesma velocidade. Esse é um dos exemplos em que é possível verificar a influência da tradição da óptica francesa. Garching tinha obtido as velocidades uniformes através da passagem de átomos pelas fendas riscadas por uma série de placas girantes⁹. Em contraste, o grupo de Paris utilizou o bombeamento óptico. Eles utilizaram um processo de três etapas baseado no fato de que os átomos com velocidades diferentes têm deslocamentos diferentes na frequência Doppler. Através do bombeamento dos átomos em vários níveis, eles conseguiram reduzir a dispersão da velocidade para 2 metros/segundo para os átomos que viajavam a 200 metros/segundo.

Essas superposições de gatos de fase poderiam ser utilizadas para ilustrar a complementaridade entre o efeito de interferência e a informação sobre qual o caminho. Scully e o grupo de Garching tinham discutido um experimento de pensamento, no qual um átomo atravessava uma das duas fendas, e a trajetória era registrada pela presença de um fóton extra em um dos *micromasers*. Nos experimentos do grupo de Haroche, o átomo tinha duas “trajetórias” distintas em um sentido diferente. Ele transita do seu estado inicial excitado (e) para o seu estado final fundamental (g), em duas maneiras diferentes. Ele pode ir de e para g , passando através da cavidade no estado g , ou pode ir de e para g , depois de já ter passado pela cavidade. Se a cavidade é retirada do aparato experimental, nós não conhecemos qual a “trajetória” que o átomo realizou, resultando em franjas de interferência. Se a cavidade é incluída, os seus campos fornecem-nos a informação sobre qual o caminho. Isso se deve ao fato de que o átomo que atravessa aquela cavidade no estado e modifica o campo em uma fase diferente do que um que atravessou no estado g .

Além de criar as superposições nesses experimentos, o grupo de Paris também estava profundamente envolvido com as questões da sua fragilidade, isto é, a rapidez com a qual elas perdem a coerência. A centralidade da descoerência está refletida em títulos de artigos, tal como *Observing the progressive decoherence of the ‘meter’ in a quantum measurement* (BRUNE et al., 1996).¹⁰ A descoerência foi vista pelos seus partidários como uma solução para o problema da fronteira entre

9 Por exemplo, ver o artigo: Rempe, Walther e Klein (1987).

10 Para todos os parágrafos antecedentes, ver também a entrevista com Serge Haroche realizada por Olival Freire e Gilles Nogues em 2004.

o mundo quântico e o cotidiano. Bohr insistiu que nós precisávamos de dois conjuntos de conceitos, o clássico e o quântico, para atribuir sentido aos fenômenos. Os teóricos da descoerência preferem a conjectura de que a Teoria Quântica é suficiente. A razão pela qual nós não vemos os efeitos estranhos das superposições quânticas no mundo macroscópico é simplesmente porque as superposições macroscópicas perdem a coerência quase instantaneamente.¹¹

Essa estreita relação entre a Física e a Filosofia sugere que os experimentos sobre a descoerência poderiam ser o caminho para a resposta da questão que fiz no início deste artigo: - Os experimentos reais afetaram a filosofia da mecânica quântica? Inicialmente, nós gostaríamos de saber se eles afetaram Haroche e os seus colegas. Nós sabemos que eles aceitaram a teoria. Até onde analisei, eles pensam que a descoerência provavelmente será a solução para o problema da fronteira entre os mundos macro e micro.¹² Contudo, nós não conhecemos como essa crença interagiu com o seu trabalho experimental.

Entretanto, a descoerência não foi um domínio exclusivo do grupo de Paris, embora o seu experimento tenha sido um dos primeiros a medi-la. Nos anos seguintes, a pesquisa teórica e experimental sobre a descoerência floresceu como um campo vigoroso dentro da Física. Os historiadores estão começando a estudar a evolução desse campo. Eu os instigo a dar alguma atenção à relação, ou à falta dela, entre os experimentos que foram feitos e as atitudes com respeito à descoerência dentro da literatura sobre a Filosofia da Física.

Também gostaria de mencionar sobre o trabalho aplicado do grupo de Paris. O mesmo estudo das superposições dos campos da cavidade, e da descoerência dessas superposições, conduziu o grupo de Paris à Teoria da Informação Quântica. Em um breve e interessante artigo publicado em 1993, o grupo propôs a utilização de átomos para criar e detectar os emaranhamentos entre os campos em duas cavidades separadas. O artigo também se referiu a superposições coerentes dos estados do campo que simultaneamente ocupam as duas cavidades. O artigo propôs fazer a medição das interferências, devido a essas superposições, e também medir as suas descoerências. Tudo isso soa como os artigos sobre a descoerência que eu já havia discutido. Mas há uma diferença semântica. Os autores estão chamando os átomos que criam as superposições de “interruptores quânticos” e eles os comparam com as portas dos circuitos lógicos. De fato, as palavras “interruptores quânticos” obtiveram um lugar de destaque, elas têm aparecido em títulos de artigos, tal como *Quantum switches and non-local microwave fields*. (DAVIDOVICH et al., 1993)

11 Para a Física e a filosofia da descoerência, ver o seguinte artigo: Schlosshauer (2007). Para mais detalhes sobre as ideias de Bohr quanto à relação entre os conceitos clássicos e quânticos, ver o artigo: Osnaghi, Freitas e Freire Jr. (2009), e as referências nele contidas.

12 Ver a seção 2.5 do artigo publicado por Haroche e Raimond (2006).

Em 1994, os físicos de Paris mergulharam plenamente na Teoria da Informação Quântica. Publicaram uma proposta para a teleportação da informação... mais especificamente, para a informação sobre o estado quântico de um átomo. Neste artigo, os autores traduziram para os termos do seu próprio equipamento um esquema que Charles Bennett da IBM, em colaboração com um grupo internacional de coautores, havia desenvolvido em 1993. Eles estão argumentando que o equipamento deles fornece capacidades realistas para a realização das ideias do grupo de Bennett (DAVIDOVICH et al., 1994). Depois disso, um número de artigos apareceu com títulos como *A simple cavity-QED two-bit universal quantum logic gate: quantum memory with a single photon in a cavity* e *Coherent operation of a tunable quantum phase gate in cavity QED*.¹³

Como todos sabem, na década de 1980 e na de 1990, estávamos realizando uma fusão da Física com a Ciência da Informação. E isso conduz imediatamente à outra questão para os historiadores. Gostaríamos de compreender como os conceitos dos físicos, incluindo a interpretação da mecânica quântica, podem estar se modificando por causa disso. É verdade que Haroche e os seus colaboradores mais próximos são céticos quanto à ideia de que a computação quântica passará a ser uma tecnologia viável (HAROCHE; RAIMOND, 1996).¹⁴ Não obstante, nós podemos nos perguntar se uma análise dos artigos do grupo de Paris poderia ser uma forma de analisar a fusão dos conceitos da Física e aqueles dirigidos à computação. Por fim, esse é o problema de pesquisa final que eu quero apresentar a vocês. Como essa união com a Ciência da Informação afetou a Física?

Para resumir, sugeri cinco tópicos, passíveis de investigação. Dois reunindo campos da História da Física, os quais estão frequentemente separados. O primeiro é a História da Eletrodinâmica Quântica dentro da Óptica. O segundo é o impacto recíproco entre a Ciência da Informação e a Física. Dois tópicos referem-se à história do *micromaser*. Primeiro, eles são uma comparação entre a pesquisa sobre o *micromaser* desenvolvida pela École Normale Supérieure e pelo Max Planck Institute for Quantum Optics; e, segundo, um estudo que analise qual a tecnologia utilizada para a construção dos *micromasers* dentro de uma visão ampla do desenvolvimento do criogênico e de outras tecnologias, no final do século XX. Finalmente, há um problema com o qual eu inicie: se e como a transição dos experimentos de pensamento para os experimentos reais afetaram a Filosofia da mecânica quântica. Apesar de eu ter iniciado a discussão, colocando-o como um problema, não finalizarei este artigo com uma solução. Responder a essa indagação continua a ser uma das tarefas da História.

13 Ver Domokos et al (1995) e Rauschenbeutel et al (1999).

14 Ver também Haroche e Raimond (2006) para uma análise das ideias mais recentes desses dois autores.

Referências

ALLEN, L; EBERLY, J. H. *Optical resonance and two-level atoms*. New York: John Wiley, 1975.

BROMBERG, J. L. Device physics vis-a-vis fundamental physics in cold war America: the case of quantum optics. *Isis*, v. 97, n. 2, p. 237-259, 2006.

_____. *The Laser in America, 1950-1970*. Cambridge, MA: The MIT, 1991.

_____. New instruments and the meaning of quantum mechanics. *Historical Studies in the Natural Sciences*, v. 38, n. 3, p. 325-352, 2008.

BRUNE, M. et al. Manipulation of photons in a cavity by dispersive atom-field coupling: Quantum nondemolition measurements and generation of “Schroedinger cat” states. *Phys. Rev. A*, v. 45, n. 7, p. 5193-5214, 1992.

BRUNE, M. et al. Observing the progressive decoherence of the ‘meter’ in a quantum Measurement’. *Phys. Rev. Lett.*, v. 77, n. 24, p. 4887-4890, 1996b.

BRUNE, M. et al. Realization of a two-photon maser oscillator. *Phys. Rev. Lett.*, v. 59, n. 17, p. 1899-1902, 1987.

BRUNE, M. et al. Quantum rabi oscillation: a direct test of field quantization in a cavity. *Phys. Rev. Lett.*, v. 76, n. 11, p. 1800-1803, 1996a.

BRUNE, M.; RAIMOND, J. M.; HAROCHE, S. Theory of the Rydberg-atom two-photon ‘micromaser’. *Phys. Rev. A*, v. 35, n. 1, p. 154-163, 1987.

CANTRELL, C. D.; SCULLY, M. O. The EPR paradox revisited, *Phys. Reports*, v. 43, n. 13, p. 499-508, 1978.

DAVIDOVICH, L. et al. Quantum switches and non-local microwave fields. *Phys. Rev. Lett.*, v. 71, n. 15, p. 2360-2363, 1993.

DAVIDOVICH, L. et al. Quantum theory of a two-photon ‘micromaser’. *Phys. Rev. A*, v. 36, n. 8, p. 3771-87, 1987.

DAVIDOVICH, L. et al. Teleportation of an atomic state between two cavities using nonlocal microwave fields. *Phys. Rev. A*, v. 50, n. 2, p. R895-R898, 1994. Part A.

DOMOKOS, P. et al, A Simple Cavity-QED two-bit universal quantum logic gate: principle and expected performances, *Phys. Rev. A*, v. 52, p. 3554, 1995.

DUCAS, T. W. et al. Stark ionization of high-lying states of sodium. *Phys. Rev. Lett.*, v. 35, n. 6, p. 366-369, 1975.

EBERLY, J. H et al. Periodic spontaneous collapse and revival in a simple quantum model. *Phys. Rev. Lett.*, v. 44, n. 20, p. 1323-1326, 1980.

FABRE, C; HAROCHE, S. Spectroscopy of one- and two-electron Rydberg atoms. In: STEBBINGS, R. F.; DUNNING, F. B. (Ed.). *Rydberg States of Atoms and Molecules*, Cambridge: Cambridge Univ., 1983. p. 117-164.

FEYNMAN, R. P. *The Feynman lectures on physics*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1963. v. I, p. 37-7 e v. III, p. 1-7.

FILIPOWICZ, F.; JAVANAINEN, J.; MEYSTRE, P. Theory of a microscopic maser. *Physical Review*, v. 34, n. 4, p. 3077-3087, oct. 1986.

GALISON, P. L. *Image and logic: a material culture of microphysics*. Chicago: Univ. of Chicago, 1997.

GLAUBER, R. J. Photon Correlations. *Physical Review Letters*, v. 10, n. 3, p. 84-86, 1963.

GHIRARDI, G. *Sneaking a look at God's cards*. Trad. Gerald Malsbary. Princeton: Princeton Univ., 2005.

GOY, P et al. Observation of cavity-enhanced single-atom spontaneous emission. *Phys. Rev. Lett.*, v. 50, n. 24, p. 1903-06, 1983.

GREENBERGER, D. M. Fundamental Problems in Quantum Theory. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 177, p. xiii-xiv, 1995.

GROSS, M. et al. Maser oscillation and microwave superradiance in small systems of rydberg atoms. *Phys. Rev. Lett.*, v. 43, n. 5, p. 343-346, 1979.

HAROCHE, S. Entrevista concedida a Olival Freire Jr. e Gilles Nogues. Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA, 10 fev. 2004.

HAROCHE, S et al., Exploration of radiative properties of very excited atoms. *Phil. Transactions Royal Soc.*, London A 307, p. 659-672, 1982.

HAROCHE, S. et al. Hyperfine quantum beats observed in Cs vapor under pulsed dye laser excitation. *Phys. Rev. Lett.*, v. 30, n. 20, p. 948-951, 1973.

HAROCHE, S.; RAIMOND, J. M. *Exploring the Quantum: atoms, cavities, and the quantum*. Oxford: Oxford University, 2006.

_____. Quantum computing: dream or nightmare? *Physics Today*, v. 49, p. 51-52, Aug. 1996.

HERMANN, I.; LECHNER, R. (Ed.). In memoriam, Prof. Herbert Walther. *Max Planck-Institut fuer Quantenoptik*, 2006.

JAYNES, E. T.; CUMMINGS, F. W. Comparison of quantum and semiclassical radiation theories with application to the beam Maser. *Proceedings of the IEEE*, v. 51, p. 89-109, 1963.

KLEPPNER, D. et al. Hydrogen-Maser principles and techniques. *Phys. Rev.*, v. 138, n. 4A, A972-A983, 1965.

KLEPPNER, D. et al. Rydberg atoms in strong fields. In: STEBBINGS, R. F.; DUNNING, F. B. (Ed). *Rydberg states of atoms and molecules*. Cambridge: Cambridge University, 1983. p. 73-116.

MESCHEDE, D; WALTHER, H; MUELLER, G. One-Atom Maser. *Phys. Rev. Letters*, v. 54, n. 6, p. 551-554, 1985.

MOI, L. et al. Rydberg-atom masers. I. A theoretical and experimental study of super-radiant systems in the millimeter-wave domain. *Phys. Rev. A*, v. 27, n. 4, p. 2043-2064, 1983.

MEYSTRE, P. Cavity Quantum Optics and the Quantum Measurement Process. In: WOLF, E. (Ed.). *Progress in Optics XXX*. Amsterdam: Elsevier Science, 1992. p. 262-355

NAKAJIMA, S. Preface. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE FOUNDATIONS OF QUANTUM MECHANICS IN THE LIGHT OF NEW TECHNOLOGY, Tokyo, 1984. *Proceedings...* Tokyo: Physical Society of Japan, 1984.

NAROZHNY, N. B.; SANCHEZ-MONDRAGON, J. J.; EBERLY, J. H. Coherence vs. incoherence: collapse and revival in a simple quantum model. *Phys. Rev.*, v. 1. a 23, n. 1, p. 236-247, 1981.

OSNAGHI, S.; FREITAS, F.; FREIRE JR., O. The origin of the everettian heresy. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 40, p. 97-123, 2009.

RAUSCHENBEUTEL, A. et al, Coherent Operation of a tunable quantum phase gate in Cavity QED, *Phys. Rev. Lett.* v. 83, p.5166, 1999.

REMPE, G.; WALTHER, H.; KLEIN, N. Observation of quantum collapse and revival in a one-atom *maser*. *Phys. Rev. Lett.*, v. 58, n. 4, p. 353-356, 1987.

SCHLOSSHAUER, M. *Decoherence and the quantum-to-classical transition*. Berlin: Springer-Verlag, 2007.

SCULLY, M. O.; DRUEHL, K. Quantum eraser: a proposed photon correlation experiment concerning observation and 'delayed choice' in quantum mechanics. *Phys. Rev.*, v. A 25, n. 4, p. 2208-2212, 1982.

SCULLY, M. O; ENGLERT, B. G; WALTHER, H. Quantum optical tests of complementarity. *Nature*, v. 351, p. 111-116, 1991.

SCULLY, M. O; SHEA, R; MCCULLEN, J. D. State reduction in quantum mechanics: a calculational example. *Phys. Reports*, v. 43, n. 13, p. 485 – 498, 1978.

STEBBINGS, R. F.; DUNNING, F. B. (Ed.). *Rydberg states of atoms and molecules*. Cambridge: Cambridge Univ., 1983.

THOME, K. S. *Editor's foreword, quantum measurement*. Cambridge: Cambridge Univ., 1992.

WALTHER, H; HALL, J. L. Tunable Dye *Laser* with Narrow Spectral Output. *Applied Phys. Lett.*, v. 17, n. 6, p. 239-242, 1970.

WOLF, E. *Introduction o the theory of coherence and polarization of light*. Cambridge: Cambridge University, 2007.

YOO, H. I; EBERLY, J. H. Dynamical theory of an atom with two or three levels interacting with quantized cavity fields. *Phys. Reports*, v. 118, n. 5, p. 239-337, 1985.