Parte I - História da teoria quântica – desenvolvimentos e fundamentos

Sobre a cultura material dos primeiros testes experimentais do teorema de Bell: uma análise das técnicas e dos instrumentos (1972-1976)

Wilson Fábio de Oliveira Bispo
Denis Gilbert Francis David

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.

Sobre a cultura material dos primeiros testes experimentais do teorema de Bell: uma análise das técnicas e dos instrumentos (1972-1976)

*Wilson Fábio de Oliveira Bispo
Denis Gilbert Francis David*

1 Introdução

Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen publicaram um artigo, em 1935, que balançou os alicerces da mecânica quântica (MQ). Através de um experimento de pensamento (*Gedankenexperiment*), esse artigo, hoje conhecido como EPR, supostamente mostrava que a MQ era uma teoria incompleta. O argumento apresentado no EPR tinha como alicerce a seguinte premissa: considere duas partículas que interagiram e estão correlacionadas em suas posições e momentos lineares; se essas duas partículas forem afastadas por certa distância e efetuarmos a medida da posição ou momento em uma dessas partículas, isso não deve modificar o “elemento de realidade” associado à outra partícula (e muito menos o resultado de uma medição na outra). Esta premissa, também conhecida como “localidade” ou “separabilidade”, faz parte do que seriam denominadas teorias de variáveis ocultas locais (TVOL).

David Bohm, quando publicou seu livro *Quantum theory*, em 1951, propôs uma mudança no experimento de pensamento apresentado no artigo EPR, a qual consistia, em suma, em utilizar variáveis bivalentes como, por exemplo, componentes de *spin* de duas partículas correlacionadas, ao invés de posição e momento. Essa mudança trouxe maior simplicidade matemática à descrição teórica do experimento, além de ter sido utilizada por John Bell no desenvolvimento de um teorema hoje denominado Teorema de Bell.

O teorema de Bell – considerado por John F. Clauser (2002, p. 61) e por Alain Aspect (1999) um dos resultados mais profundos da Física do século XX – é uma desigualdade matemática que mostra uma incompatibilidade entre a MQ e quaisquer TVOL. Seu surgimento ocorreu em 1964, quando Bell derivou uma de suas desigualdades, satisfeita por quaisquer TVOL, mas violada pela mecânica quântica.¹ De um lado estava a MQ, com certa ideia de “não localidade”; de outro, as TVOL, com a separabilidade (ou localidade). Uma possível solução para resolver esse impasse apareceu com o artigo publicado por Clauser, Horne, Shimony e Holt em 1969, onde, a partir da generalização das desigualdades de Bell e de algumas modificações no experimento de Kocher e Commins (1967), eles propuseram um experimento realizável que poderia testar as desigualdades de Bell, surgindo ulteriormente os primeiros experimentos que as testaram.

Analisamos aqui a cultura material dos primeiros experimentos, com fótons polarizados, que testaram as desigualdades de Bell, i.e., os experimentos realizados por Freedman e Clauser (1972), Clauser (1976) e Fry e Thompson (1976). Eles confirmaram as previsões da mecânica quântica, violando as desigualdades de Bell e foram muito influentes no desenvolvimento da pesquisa sobre fundamentos da física quântica. Nesta análise, procuramos entender como eram os aparatos, como funcionavam e quais seus papéis nos experimentos, além de explicar as técnicas de excitação, detecção e contagem utilizadas, bem como seus desenvolvimentos de um experimento para outro. Fazemos ainda uma análise histórica dos instrumentos cruciais para a realização desses experimentos, com o intuito de verificar se eles já poderiam ter sido realizados anteriormente e com isso tentar entender como a Ciência se desenvolveu naquele período e contexto.

A análise histórica dos instrumentos está baseada na abordagem historiográfica focada na história dos instrumentos. (PESTRE, 1996) Atualmente, a história dos instrumentos está bem estabelecida na história das ciências, seja pela Scientific Instruments Commission (organização filiada à International Union of the History and Philosophy of Science, que busca encorajar estudantes na pesquisa em história de instrumentos, preservação, documentação e coleção de instrumentos, bem como seu uso na história da ciência) ou pelos trabalhos de Peter Galison, mais precisamente aqueles relacionados à ideia de cultura material (GALISON, 1997, 1999). Cultura material é tudo aquilo que o homem cria (ou concebe) e que utiliza na sua vida cotidiana, de modo a extrair do meio envolvente tudo de que necessita. (NOGUEIRA, 2000, p. 192) Em outras palavras, o conjunto de objetos – tecidos, utensílios, ferramentas, adornos, meios de transporte, moradias, armas – que formam o ambiente concreto de determinada sociedade.

1 Sobre as desigualdades de Bell ver Pessoa Jr (2006, cap. 27). Para um maior aprofundamento ver Pessoa Jr. (2006, cap. 28); Bell (1964) ou Freire Jr. (1991).

2 Componentes da cultura material dos experimentos

Este estudo está baseado numa análise dos instrumentos que compõem os experimentos. O principal objetivo desses experimentos foi testar o teorema de Bell, ou seja, verificar se os resultados experimentais encontrados estavam de acordo com as previsões teóricas da MQ ou das TVOL. Nessa verificação, media-se o coeficiente de correlação de polarização linear (grandeza que indica se um fóton está correlacionado em polarização com o outro) de dois fótons emitidos de uma cascata de cálcio ou mercúrio. Discutiremos agora mais detalhadamente os instrumentos referentes a cada experimento, nos tópicos que seguem.

2.1 Experimento realizado por Freedman e Clauser

Indica-se abaixo o esquema experimental apresentado por Freedman e Clauser, no artigo que descreve este experimento²:

Figura 1: Esquema do experimento

Fonte: Freedman e Clauser (1972)

O forno de tântalo emitia um feixe de cálcio na forma de vapor, o qual era excitado, através do fenômeno da absorção por ressonância, pela luz de uma lâmpada de arco de deutério (também chamada lâmpada de descarga). Após a excitação, no decaimento que segue, pares de fótons eram emitidos e selecionados por filtros de interferência (ou interferômetros de Fabry-Pérot). Com a necessidade de concentrar esses fótons no menor volume possível, aproveitando-os ao máximo e aumentando assim a acumulação de dados, foram usadas lentes primárias (ou seja, as primeiras a receber a luz vinda da fonte) anaesféricas (afastam-se do formato esférico, com o intuito de reduzir as aberrações esféricas; devido a esse efeito, onde se deveria ver um ponto, vê-se uma mancha).

2 DISC (Discriminadores), T.A.C. (Conversor Tempo Amplitude), P.H.A. (Analisador de Altura de Pulso), P.M. (Fotomultiplicadores).

Houve também a necessidade de selecionar as polarizações (paralela ou perpendicular ao plano dos polarizadores) dos fótons correlacionados e, para tanto, foram usados polarizadores do tipo pilha de placas (*pile-of-plates*). Estes eram dez lâminas de vidro inclinadas, próximas ao ângulo de Brewster. Em cada lâmina ocorriam duas reflexões, uma em cada face, onde parte da luz que tinha certa polarização era refletida e a outra, com outra polarização, era transmitida. Um mecanismo com dois eixos paralelos interligados por uma cruz de Malta e por dois discos, chamado Mecanismo Geneva, girava os polarizadores num incremento de $27,5^\circ$, para evidenciar melhor uma violação das desigualdades de Bell, já que os ângulos de maior violação eram os de $27,5^\circ$ e $67,5^\circ$.

A detecção era realizada através do tubo fotomultiplicador (fototubo) que, ao absorver a luz incidente, emitia elétrons (devido ao efeito fotoelétrico) e os multiplicava por emissão secundária. O primeiro fototubo foi criado em 1930 por Koller e Campbell³, contudo, os fototubos utilizados pelos autores - chamados “quanticons” (fototubos que faziam contagem de fótons únicos) - foram mais sofisticados. Estes fototubos só foram aperfeiçoados no início da década de 1970, conforme afirmou o próprio Freedman, quando “[...] fazer boas contagens de fótons únicos tinha acabado de ser desenvolvido”. (GILDER, 2008, p. 266)

A contagem dos fótons era feita por meio do circuito de coincidência, um aparato eletrônico cuja finalidade consistia em verificar se o par detectado, de fato, era o par correlacionado, sendo esta verificação feita através da janela de coincidência (tempo em que os dois detectores permanecem abertos simultaneamente) que, neste experimento, era de 8,1ns. Os precursores da contagem de coincidência, ainda sem o uso da eletrônica, foram Bothe e Geiger, em 1924⁴, no entanto, o circuito de coincidência foi desenvolvido por Bruno Rossi, em 1930, trabalhando com física de raios cósmicos em Arcetri, Universidade de Florença.⁵ Apesar de ter sido desenvolvido em 1930, o circuito de coincidência só poderia ser utilizado nos experimentos com a mesma precisão alcançada na década de 1950, devido ao desenvolvimento do transistor, que proporcionou um tempo de resposta para o circuito da ordem do nano segundo.

2.2 Experimento realizado por Clauser

Os filtros de interferência, polarizadores, fototubos e circuito de coincidência já foram explicados anteriormente. Nesse experimento, havia um terceiro fototubo, ligado a um laço de realimentação (*servo loop*), usado para estabilizar a

3 Ver PHOTOMULTIPLIER tubes... (1999).

4 Para maiores detalhes, ver Bothe (1955).

5 *Physics Today*, 34-10, Oct. 1981, p. 35-36.

corrente do feixe de elétrons excitador, de modo que, se a emissão de fótons fosse baixa, o sinal do fototubo aumentava a corrente, o que fazia com que aumentasse a emissão de fótons; caso contrário, o sinal do fototubo diminuía a corrente, diminuindo assim a emissão de fótons.

Para evitar a influência do campo magnético terrestre sobre os níveis excitados, os autores utilizaram bobinas na posição de Helmholtz, criando um campo magnético oposto, de maneira a anular ou manter esse campo com intensidade menor que 50mG. Estas são duas bobinas circulares, planas, contendo N espiras percorridas por correntes no mesmo sentido, que produzem um campo magnético uniforme sobre um volume relativamente grande, cobrindo a zona de excitação.

2.3 Experimento realizado por Fry e Thompson

Forno, lentes, filtros, polarizadores e fototubos já foram explicados anteriormente. Um canhão solenoidal de elétrons bombardeava o mercúrio com o intuito de excitá-lo, realizando assim o primeiro passo da excitação. O segundo passo era feito por absorção de ressonância de um *laser* de corante sintonizável. Este emitia um feixe mono-modo (de modo único, isto é, possuindo uma linha única de emissão espectral), com comprimento de onda de $5461\text{\AA}$ na faixa do visível. Os primeiros *lasers* foram colocados em operação em 1960 (BROMBERG, 2006, p. 240), porém o *laser* sintonizável só foi desenvolvido em 1965, por Peter Sorokin e John Lankard. De fato, eles desenvolveram o material principal para que este *laser* fosse constituído, embora o mesmo tenha sido terminado alguns anos depois. (FREIRE JR., 2006, p. 601)

3 Sobre as técnicas utilizadas nos experimentos

Podemos dividir os experimentos aqui analisados em três técnicas: de excitação, de detecção e de contagem. A primeira é caracterizada pela excitação dos átomos e emissão dos fótons correlacionados; a segunda técnica é caracterizada pela seleção, detecção e transformação dos fótons em pulsos elétricos; e, por fim, a terceira foi a da contagem de coincidência (ou técnica de coincidência), caracterizada pela contagem dos pares correlacionados. Comentaremos agora sobre as particularidades de cada uma dessas técnicas nos seus respectivos experimentos, bem como a diferença e desenvolvimento de cada uma delas de um experimento para outro, caso haja.

3.1 Experimento realizado por Freedman e Clauser (1972)

Na técnica de excitação, um feixe de cálcio, oriundo de um forno de tântalo, era excitado através do processo de absorção de ressonância, onde uma lâmpada de arco de deutério emitia um feixe contínuo de luz ultravioleta, com comprimento de onda de 227,5nm. Antes de excitar o átomo de cálcio, a luz da lâmpada de deutério passava por lentes e filtros, para colimar e selecionar o feixe. A região de interação – local onde o cálcio interagiu com a luz para realizar a excitação – consistia de um cilindro de vidro pirex de 5mm de altura e 3mm de diâmetro, onde a densidade de cálcio era 10^{10} átomos/cm³. Os átomos de cálcio passavam do nível fundamental $4s^2\ ^1S_0$ (nesta notação, a primeira parte, $4s^2$, representa o estado eletrônico; e a segunda parte, 1S_0 , foca o estado de *spin*) para o nível excitado $3d4p\ ^1P_1$. Dos átomos que não decaíam diretamente para o estado fundamental, apenas 7% decaía para o estado $4p^2\ ^1S_0$, a partir do qual ocorria mais dois decaimentos, passando pelo estado intermediário $4p4s\ ^1P_1$, dando origem ao par de fótons correlacionados em polarização, emitidos de uma cascata $J=0, J=1, J=0$ (onde J é o momento angular total). Assim, a quantidade de dados coletados foi relativamente baixa, comparada ao total de fótons emitidos. Como estes eram experimentos estatísticos, a quantidade de dados era fator fundamental. A duração do experimento foi de 200h. Abaixo o esquema do decaimento em cascata apresentado pelos autores:

Figura 2 – Decaimento em cascata

Fonte: Freedman e Clauser (1972).

A técnica de detecção não se caracteriza apenas pela detecção em si, mas também pelas condições ideais para que ela ocorresse. Essas condições estão relacionadas à seleção dos fótons, com o devido comprimento de onda e a devida polarização, e à manutenção do ambiente com baixa luminosidade e baixa intensidade do campo magnético. Como as emissões ocorriam em diversas direções,

foram usadas lentes colimadoras com grande ângulo de aceitação, aumentando a eficiência do experimento e reduzindo a possibilidade de um dos detectores contar um fóton pertencente ao par e o outro detector, de não contar o outro fóton pertencente ao referido par, perdendo assim a medida. Outra necessidade era a de escolher os fótons que realmente pertenciam ao par correlacionado. A primeira seleção era feita com os filtros de interferência, onde só passavam os fótons com os devidos comprimentos de onda; a segunda, pelos polarizadores, onde se escolhia a polarização correta dos fótons. Se a polarização coincidisse com o inverso da outra, a contagem era efetuada; caso contrário, não. Como a maior violação das desigualdades de Bell ocorre nos ângulos φ (ângulo entre as orientações dos dois polarizadores) iguais a $22,5^\circ$ e $67,5^\circ$, os polarizadores giravam num incremento de $22,5^\circ$, para suprir esta necessidade. A detecção era concluída com a chegada dos fótons nos fototubos, resfriados com o intuito de reduzir a contagem de eventos aleatórios de origem térmica.

Na técnica de contagem, cada fototubo estava ligado a um discriminador e estes, por sua vez, estavam ligados a dois contadores de coincidência e a um conversor tempo-amplitude. O primeiro contador fazia a contagem de todas as coincidências. O segundo tinha um atraso em um dos canais de 50ns, para contar coincidências acidentais, as quais posteriormente seriam subtraídas das coincidências totais, obtendo-se assim a coincidência real. Um conversor tempo-amplitude estava ligado a um analisador de altura de pulso, e esse conjunto media o tempo de atraso do espectro de dois fótons, sendo que o resultado indicava o tempo de vida do estado intermediário, $\sim 5\text{ns}$ (tempo que o átomo permanece no estado excitado). A taxa de coincidência dependia do feixe e da intensidade da lâmpada, a qual foi decrescendo gradualmente durante o experimento. O tempo de resolução de todo sistema foi de 1,5ns. O curto tempo de vida do estado intermediário permitiu uma estreita janela de coincidência de 8,1ns. Só foi possível fazer contagens de coincidências com uma janela tão estreita, depois do desenvolvimento do transistor, em 1947⁶, isto porque, anteriormente, a eletrônica baseada no uso de válvulas não era tão eficiente nesse aspecto, pois a maioria das válvulas trabalhava na frequência do mega hertz⁷ (tempo de resposta da ordem do microssegundo)⁸.

6 Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Trans%C3%ADstor>>. Acesso em: 09 set. 2009.

7 Disponível em: <<http://www.fazano.pro.br/port62.html>>. Acesso em: 21 set. 2009.

8 Apesar do magnetron de cavidade (válvula de alta frequência, usada nos primeiros radares e em fornos de micro ondas, que atingia até 3,33GHz) já existir em 1943, esta válvula não é um tubo capaz de amplificar um sinal, é um oscilador (um espécie de pequeno acelerador circular de elétrons), logo não era possível fazer um circuito de coincidência a partir dele.

3.2 Experimento realizado por Clauser

A técnica de excitação foi realizada através de bombardeamento de elétrons, onde o choque destes com o átomo de mercúrio excitava a amostra, ocorrendo assim um decaimento em cascata ($J=1 \rightarrow J=1 \rightarrow J=0$). Toda a fonte estava encerrada em um bulbo de pirex, contendo 91% de Hg^{202} , 2,1% de Hg^{199} e 2,2% de Hg^{201} . Um feixe de elétrons de 135eV foi focalizado no bulbo por furos colimadores de 2mm de diâmetro. Os fótons correlacionados por polarização eram emitidos da cascata $9^1S_1 \rightarrow 7^3S_1 \rightarrow 6^3P_0$, com comprimentos de onda iguais a $\lambda_1 = 5676\text{\AA}$ e $\lambda_2 = 4046\text{\AA}$. Com o objetivo de manter uma corrente de $125\text{nA} \pm 1\%$, um terceiro fototubo foi colocado externo à região de interação, o qual dirigia um *servo loop* (laço de realimentação) que estabilizava a corrente. As condições para excitação eram mais trabalhadas do que no experimento anterior. Além de manter a corrente estabilizada, era necessário manter um baixo campo magnético (menor que 50mG), evitando a ação do campo magnético terrestre sobre os níveis de energia. O tempo de realização do experimento foi de 412h.

A técnica de detecção utilizada foi similar a do experimento realizado por Freedman e Clauser, contudo, agora os fótons foram emitidos de uma cascata de mercúrio, o que fez com que os filtros, lentes e polarizadores fossem diferentes, já que os comprimentos de onda foram diferentes, bem como os detectores (fototubos).

A técnica de coincidência foi a mesma explicada no experimento anterior. (FREEDMAN; CLAUSER, 1972)

3.3 Experimento realizado por Fry e Thompson

A técnica de excitação foi diferente dos experimentos anteriores; neste caso, o mercúrio foi excitado em dois passos, que ocorreram em locais físicos diferentes. O primeiro, por bombardeamento de elétrons, onde um feixe deles de 135eV excitava o mercúrio para o nível 6^3P_2 , um fototubo gerenciava um *servo loop* para estabilizar a corrente em 125mA, com um desvio de $\pm 1\%$. O segundo passo era por absorção de ressonância de um *laser* sintonizável de comprimento de onda de $\lambda = 5461\text{\AA}$, onde o mercúrio era excitado para o nível 7^3S_1 . O decaimento em cascata que originava o par de fótons correlacionados era do nível 7^3S_1 para o nível 6^3P_1 , emitindo um fóton com comprimento de onda de $4358\text{\AA}$, e do nível 6^3P_1 para o nível 6^1S_0 , emitindo outro fóton com comprimento de onda de $2537\text{\AA}$. O *laser* sintonizável interceptava o feixe de mercúrio em dois locais diferentes. O primeiro, antes da região de interação, para verificar a fluorescência da fonte garantindo que esta seja máxima; e o segundo, na região de interação (onde o nível 7^3S_1 era povoado). Nesta não ocorria outro estado de decaimento em cascata,

além do que originava os fótons correlacionados, por isso existia uma relação de um decaimento para cada par de fótons, o que evitava possíveis contagens que não fossem do par de fótons correlacionados. Com isto, foi obtido um resultado bastante satisfatório na acumulação de dados, em relação aos dois experimentos realizados anteriormente. A grande novidade surgida nesta técnica foi o uso do *laser* sintonizável no segundo passo da excitação, pois, além de ter melhorado a acumulação de dados e ter evitado possíveis contagens não válidas, reduziu o tempo de realização do experimento para 80min, enquanto que no experimento realizado por Freedman e Clauser foi de aproximadamente 200h e no realizado por Clauser, 412h.

As técnicas de detecção e de contagem de coincidência foram similares a dos experimentos anteriormente analisados.

4 Conclusão

A análise histórica dos aparatos nos mostra que quase todos os aparatos utilizados nos experimentos já tinham sido criados desde 1930, exceto os *quanticons*, o *laser* e o transistor. Contudo, a análise das técnicas nos diz que apenas o desenvolvimento de alguns desses aparatos, no período entre o pós-guerra e o final da década de 1960, permitiu a realização de experimentos testando as desigualdades de Bell. A técnica de excitação para os dois primeiros experimentos analisados já estava desenvolvida desde 1930; contudo, para o terceiro experimento só esteve disponível a partir de 1965, devido ao uso do *laser* sintonizável. A técnica de detecção só estava desenvolvida a partir do final da década de 1960, devido ao uso dos *quanticons*. A técnica de contagem de coincidência só estava desenvolvida, a ponto de ser utilizada com a mesma precisão, na década de 50, devido ao desenvolvimento do transistor. Com isto, podemos afirmar que, apesar de os aparatos já terem surgidos anteriormente, os experimentos analisados não poderiam ter sido realizados antes da década de 1970, já que havia a necessidade de se fazer contagens de fótons únicos com boa precisão estatística e os *quanticons* só estavam desenvolvidos no início da década de 1970, sendo este um fator determinante para o sucesso desses experimentos. Notemos também que o desenvolvimento de uma técnica estava intimamente ligado ao desenvolvimento ou a criação de um novo dispositivo ou aparato, como no exemplo do *laser* sintonizável; logo,

[...] a prática e o desenvolvimento das ciências só podem ser estudados sem se separar jamais o conceitual, o material ou o instrumental do técnico ou do político. Sempre misturadas, a lógica de uns redefine permanentemente a dinâmica dos outros. (PESTRE, 1996, p. 21-22)

Referências

- ASPECT, A. Bell's inequality test: more ideal than never. *Nature*, v. 398, 18 mar. 1999.
- BELL, J. S. On the Einstein, Podolsky and Rosen paradox. *Physics*, n. 1, p. 195-200, 1964.
- BOTHE, W. Coincidence method. *Science*, v. 122, n. 3175, nov. 1955.
- BROMBERG, J. L. Device physics vis-a-vis fundamental physics in cold war America: the case of quantum optics. *Isis*, v. 97, p. 237-259, 2006.
- CLAUSER, J. F. Early history of Bell's theorem. In: BERTLMANN, R.A; ZEILINGER, A. (Org.). *Quantum [un]speakables: from bell to quantum information*. Berlin: Springer, 2002, p. 61.
- CLAUSER, J. F. et al. Proposed experiment to test local hidden variable theories. *Physical Review Letters*, v. 24, issue 10, p. 549, 1969.
- CLAUSER, J. F. Experimental Investigation of Polarization Correlation Anomaly. *Physical Review Letters*, n. 36, p. 1221-1226, 1976.
- EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B.; ROSEN, N. Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review Letters*, n. 47, p. 777, 1935.
- FREEDMAN, S. J.; CLAUSER, J. F. Experimental tests of local hidden-variable theories. *Physical Review Letters*, v. 28, n. 14, p. 938-941, 1972.
- FREIRE JR., O. *David Bohm e a controvérsia dos quanta*. Campinas (SP): UNICAMP, 1999.
- FREIRE JR., O. Philosophy enters the optics laboratory: Bell's theorem and its first experimental tests (1965-1982). *S.H.P.M.P.*, v. 37, p. 577-616, 2006.
- FREIRE JR., O. Sobre as desigualdades de Bell. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 8, n. 3, p. 212-26, dez. 1991.
- FRY, E. S.; THOMPSON, R. L. C. Experimental Tests of Local Hidden Variable Theories. *Physical Review Letters*, v. 37, n. 8, p. 465-468, 1976.

GALISON, P. Culturas etéreas e culturas materiais. *A ciência tal qual se faz*. In: FERNANDO, G. Lisboa: Edições João de Sá, 1999. p. 395-414.

_____. *Image and logic: the material culture of microphysics*. Chicago: University of Chicago, 1997.

GILDER, L. *The age of entanglement: when the quantum physics was reborn*. New York: Alfred A. Knopf 2008.

KOCHER, C. A.; COMMINS, E. D. Polarization correlation of photons emitted in an atomic cascade. *Phy. Rev. Let.*, v. 18, n. 15, p. 575-577, 1967.

PHOTOMULTIPLIER tubes: basics and applications. 3rd. ed. [S.l]: Hamamatsu, 2006? Disponível em: <http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/ETD/pmt_handbook_complete.pdf>. Acesso em: 2010.

NOGUEIRA, Sandra. A tanoaria no Concelho do Cartaxo. In: PROGRAMA Nacional de Bolsas de Investigação para Jovens Historiadores e Antropólogos. 3. ed. Lisboa; Porto: Fundação da Juventude, 1996/1997. p. 184-293. 2000, v. 3, p. 192.

PESSOA JR., O. *Conceitos de física quântica*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006. v. 2, cap. 27 e 28.

PESTRE, D. Por uma nova história social e cultural das ciências: novas definições, novos objetos, novas abordagens. *Cadernos IG*, São Paulo, Unicamp, v. 6, n.1, 1996.