

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

WILSON FÁBIO DE OLIVEIRA BISPO

SOBRE A CULTURA MATERIAL DOS
PRIMEIROS TESTES EXPERIMENTAIS DO
TEOREMA DE BELL: UMA ANÁLISE DOS
INSTRUMENTOS (1972-1982).

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM HISTÓRIA DAS CIÊNCIAS.



SALVADOR-BA

JULHO/2009

WILSON FÁBIO DE OLIVEIRA BISPO

SOBRE A CULTURA MATERIAL DOS
PRIMEIROS TESTES EXPERIMENTAIS DO
TEOREMA DE BELL: UMA ANÁLISE DOS
INSTRUMENTOS (1972-1982).

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM
HISTÓRIA DAS CIÊNCIAS SUBMETIDA AO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENSINO, FILOSOFIA E HISTÓRIA DAS
CIÊNCIAS, COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO
DO GRAU DE MESTRE EM HISTÓRIA DAS
CIÊNCIAS NA ÁREA DE HISTÓRIA DA
FÍSICA.

ORIENTADOR: OLIVAL FREIRE JÚNIOR

CO-ORIENTADOR: DENIS GILBERT FRANCIS DAVID

SALVADOR-BA

JULHO/2009

DEDICATÓRIA

Desde criança tinha um sonho
Sonhava em ser um mestre
Mestre das artes marciais ou algo parecido
Mas acima de tudo, um mestre sábio
Onde todos o procuravam
Buscando seus conselhos e ensinamentos
Um mestre amável, bondoso, sensato
Querido por todos
Rígido nas horas certas
Serenos nas horas turbulentas
Pois é, dei o primeiro passo.

Dedico esta dissertação a todos os sonhadores.

Em especial, a todos aqueles que sempre acreditaram em seus sonhos e fizeram o que foi preciso para que eles se concretizassem.

Nunca desista de seus sonhos.

*“Um sonho que se sonha só
É só um sonho que se sonha só
Mas um sonho que se sonha junto é realidade”*

Raul Seixas.

MENSAGEM

Sorri quando a dor te torturar
E a saudade atormentar
Os teus dias tristonhos vazios

Sorri quando tudo terminar
Quando nada mais restar
Do teu sonho encantador

Sorri quando o sol perder a luz
E sentires uma cruz
Nos teus ombros cansados doloridos

Sorri vai mentindo a sua dor
E ao notar que tu sorris
Todo mundo ira supor
Que és feliz

Smile

(Charles Chaplin/G. Parsons/J. Turner - Vs. Braguinha).

Canção na voz de Djavan, álbum “Malásia”.

AGRADECIMENTOS:

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado força para continuar quando pensei em desistir, esperança quando me faltou fé, coragem nos momentos mais árduos, bom ânimo nos momentos de tristeza e por ter me guiado em cada passo da minha vida.

Agradeço, direta e indiretamente, a minha esposa, Natália. Diretamente por expor sua opinião, discutir suas idéias comigo, ter digitado algumas vezes enquanto eu ditava e pelas dicas de como fazer apresentação no “power point”. Indiretamente pelo apoio moral, sempre que possível, por sorrir comigo, me acompanhar em minha caminhada e por me aturar. Amo-te. Sem você me sinto vazio.

A todos que me apoiaram diretamente:

A Olival, meu orientador, por ter acreditado em mim desde o começo (quando fiz iniciação científica), pelos seus ensinamentos, simplicidade e competência, o mundo está precisando de pessoas como você;

A Denis, meu co-orientador, por ter andado ao meu lado nesta caminhada, por toda a atenção e apoio incondicionais e pelo empenho em me ensinar. Lembro-me quando Olival me perguntou quem eu escolheria para ser meu co-orientador, nem pensei duas vezes, por já conhecer a pessoa maravilhosa que você é;

A Aurino, por sempre ter me incentivado de forma única, principalmente quando pensei em desistir de fazer a prova de seleção para o mestrado o qual agora apresento esta dissertação. Sua simplicidade é espelho para todos nós, seus alunos;

A Fábio Freitas que foi quem me apresentou a meu orientador, que contribuiu significativamente na conclusão desta dissertação e sempre me deu total apoio em toda a minha caminhada. Você é um amigo de verdade. “Valeu cara”, é sempre bom ter alguém com quem contar;

A Vinicius Zumaeta, amigo, colega e companheiro que compartilhou comigo grande parte de minha caminhada, com cumplicidade e alegria, dividindo os momentos árduos e sempre sorrindo comigo;

A Newton Barros por aceitar o convite de compor a banca, mesmo sabendo da sufocada maratona de ter doze dias para ler minha dissertação e pelas suas contribuições desde a minha iniciação científica;

A Ossamu pelas suas sugestões e por sua sinceridade, no mundo de hoje é difícil ser sincero;

A todos do grupo (LACIC) pelo apoio e companheirismo em todo este percurso, inclusive Indianara que me forneceu o artigo do Bothe e Geiger;

A todos do instituto de Física da UFBA, em especial a Lorena que revisou um ensaio o qual ulteriormente se transformaria no primeiro capítulo desta dissertação;

Aos que me apoiaram indiretamente:

A minha mãe por tudo. Eu sei que a senhora está mais feliz que eu com essa conquista;

A todos os meus amigos de verdade (vocês sabem que estou falando de cada um de vocês). Não vou arriscar a listá-los pelo fato de serem muitos e por eu ter uma memória não tão confiável. Um dos maiores tesouros na vida de uma pessoa são suas amizades verdadeiras;

A todos os meus parentes: sobrinhos (Matheus em especial, por ser fonte inspiração), irmãos, afilhados, primos, em especial a Sidnei de Abreu Galvão (*in memorian*) por ter me ensinado a respeitar as pessoas e aceitá-las como elas são e também por um dia ter me entregado um pedacinho de papel datilografado com letras maiúsculas e vermelhas que dizia “A vida é um período transitório em nossa existência, por isso viva. Lembre-se de quando você nasceu todos riam e só você chorava. Viva de certa forma que quando você morra todos chorem e só você sorria”. Esta frase mudou a minha vida de forma muito significativa, além de ter me servido como bússola. Valeu “Cá”, onde quer que você esteja fique com Deus;

Aos meus cães “Planck” e “Lucky”, por me receberem sempre com festa e alegria. Saibam que eu invejo vocês, pois “levar uma vida de cão” é uma maravilha: come, dorme, brinca, se gostar balança o rabo, se não gostar morde, não precisa fazer dissertação, etc;

Esta é uma conquista de todos vocês.

RESUMO

Analizamos aqui a cultura material dos primeiros experimentos com fótons ópticos que testaram as desigualdades de Bell, a saber, os experimentos realizados por: Freedman e Clauser (1972); Clauser (1976); Fry e Thompson (1976); Aspect, Grangier e Roger (1981); Aspect, Grangier e Roger (1982) e Aspect, Grangier e Dalibard (1982). Nesta análise buscamos entender o que eram os aparatos, como funcionavam e quais suas utilidades nos experimentos, incluindo também uma análise histórica dos principais aparatos utilizados na realização dos experimentos, verificando quando tais aparatos surgiram, com o intuito de responder a seguinte pergunta: estes experimentos já poderiam ter sido realizados anteriormente? Para responder esta pergunta tivemos a necessidade de fazer uma análise das técnicas de excitação, detecção e contagem de coincidência utilizadas em cada um desses experimentos, já que alguns tópicos eram essenciais serem discutidos e não estavam diretamente relacionados a algum aparato específico e sim a uma técnica, como, por exemplo, a região de interação, a janela de coincidência, a excitação, etc, além desses experimentos poderem ser divididos nestas três técnicas.

A análise dos instrumentos nos informou que todos os aparatos já tinham sido descobertos na década de 1930, exceto os lasers e os quanticons. Contudo, a análise das técnicas nos mostrou que os experimentos em questão não poderiam ter sido realizados anteriormente à década de 1970, por que a técnica de detecção não estava desenvolvida a ponto de ser aplicada nos experimentos com a mesma precisão.

ABSTRACT

In this work we analyze the material culture of first experiments with optical photons that tested the inequalities of Bell realized by Freedman and Clauser (1972), Clauser (1976), Fry and Thompson (1976), Aspect, Grangier and Roger (1981), Aspect, Grangier and Roger (1972), Aspect, Grangier and Dalibard (1982). In this analysis we explained what the instruments were, how they operated and what their principal functions in the experiments were, including a historical study of the instruments, checking when such apparatus originated, rummaging answer the question: these experiments could be realized before? To answer this question we needed to do yet an analysis of the technique of excitation, detection and counting, because it was necessary talk over some topics that were not related with some apparatus but with a technique – for example the coincidence window, interaction region, excitation, etc – beyond they can be separated in these three techniques.

The analysis of the instruments said that all instruments had already been originated in 1930, except the lasers and the quanticons. Though the analysis of the technique show us that this experiments not could had be realized before 1970 because the detection technique was not developed to be apply in the experiments with same precision.

SUMÁRIO

Capítulos/Sub-Capítulos.....	Páginas
INTRODUÇÃO.....	13
1 UM POUCO DE HISTÓRIA, METODOLOGIA E REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
1.1 Um pouco de História.....	17
1.1.1 Um breve relato sobre a Mecânica Quântica.....	17
1.1.2 A Interpretação Probabilística.....	19
1.1.3 O Conselho Solvay de 1927.....	20
1.1.4 O artigo EPR.....	22
1.1.5 A primeira afirmação feita no artigo EPR.....	23
1.1.6 A segunda afirmação feita no artigo EPR, o paradoxo e a conclusão dos autores.....	24
1.1.7 A resposta de Bohr ao artigo EPR	26
1.1.8 David Bohm e sua participação na controvérsia.....	28
1.1.9 A Prova de von Neumann.....	30
1.1.10 As Desigualdades de Bell.....	30
1.1.11 Uma possível solução para o impasse.....	35
1.1.12 Buscando uma visão.....	36
1.2 Metodologia.....	37
1.3 Referencial teórico.....	41
2 OS EXPERIMENTOS, SUAS TÉCNICAS, SEUS AUTORES E SEUS RESULTADOS.....	45
2.1 O experimento realizado por Freedman e Clauser (1972).....	47
2.2 O experimento realizado por Clauser (1976).....	55
2.3 O experimento realizado por Fry e Thompson (1976).....	58
2.4 O experimento realizado por Aspect, Grangier e Roger (1981).....	61
2.5 O experimento realizado por Aspect, Grangier e Roger (1982).....	64
2.6 O experimento realizado por Aspect, Grangier e Dalibard (1982).....	69
3 A CULTURA MATERIAL DOS EXPERIMENTOS.....	73
3.1 Componentes da CM do Experimento realizado por Freedman e Clauser (1972).....	74

3.2 Componentes da CM do Experimento realizado por Clauser (1976).....	86
3.3 Componentes da CM do Experimento realizado por Fry e Thompson (1976).....	90
3.4 Componentes da CM do primeiro Experimento realizado por Aspect, Grangier e Roger (1981).....	94
3.5 Componentes da CM do segundo Experimento realizado por Aspect, Granrier e Roger (1982).....	97
3.6 Componentes da CM do Experimento realizado por Aspect, Grangier e Dalibard (1982).....	100
4 CONCLUSÃO.....	105
5 BIBLIOGRAFIA.....	107

Lista de abreviaturas.

Ca	Cálcio.
CHSH	Clauser, Horne, Shimony e Holt.
CM	Cultura Material.
Disc	Discriminadores.
Dye	(corante).
EPR	Einstein, Podolsky e Rosen.
EPRB	Einstein, Podolsky, Rosen e Bohm
FAPESB	Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado da Bahia.
Fig	Figura.
FWHM	Full width at half-maximum.
HC	História da Ciência.
Hg	Mercúrio.
IC	Iniciação Científica.
Kr	Criptônio.
LAPO	Laboratório de Propriedades Ópticas – UFBA.
MCA	Analisador multi-canal (multichannel analyzer).
MQ	Mecânica Quântica.
Pag	Página.
PHA	Analisador de altura de pulso (pulse height analyzer).
PM ou PMT	Photo-multiplier (tubos fotomultiplicadores ou fototubos).
Pol	Polarizadores.
PPEFHC	Programa de Pós-Graduação em Ensino Filosofia e
TAC	Conversor tempo-amplitude (time to amplitude conversor).
TQ	Teoria Quântica.
TVOL	Teoria de Variáveis Ocultas Locais.
UFBA	Universidade Federal da Bahia.
HC	História das Ciências.

Lista de Figuras.

Figuras.....	Pag.
Fig 1 – Versão de Bell do experimento EPRB.....	33
Fig 2 – John F. Clauser junto com seu aparato experimental.....	49
Fig 3 – Stuart Jay Freedman.....	49
Fig 4 – Esquema do decaimento Ca.....	50
Fig 5 – Gráfico $\frac{R(\varphi)}{R_0}$ versus φ	55
Fig 6 – Eduward S. Fry.....	59
Fig 7 – Esquema do decaimento do Hg.....	60
Fig 8 – Alain Aspect.....	62
Fig 9 – Philippe Grangier.....	63
Fig 10 – Esquema do decaimento Ca.....	64
Fig 11 – Experimento de pensamento EPRB.....	66
Fig 12 – Jean Dalibard.....	70
Fig 13 – Esquema do experimento realizado por Freedman e Clauser.....	75
Fig 14 – Lâmpadas de arco.....	77
Fig 15 – Filtros de interferência.....	78
Fig 16 – Interferômetro Fabry-Perót.....	79
Fig 17 – Esquema dos Polarizadores Pilhas de Placas.....	81
Fig 18 – Esquema de funcionamento do Mecanismo Geneva.....	82
Fig 19 – Esquema de funcionamento do tubo fotomultiplicador.....	83
Fig 20 – Fotografia do fototubo.....	83
Fig 21 – Esquema do experimento realizado por Clauser.....	87
Fig 22 – Bobina de Helmholtz.....	89
Fig 23 – Esquema do experimento realizado por Fry e Thompson.....	91
Fig 24 – Esquema experimental Aspect, Grangier e Roger (1981).....	95
Fig 25 – Esquema experimental Aspect, Grangier e Roger (1982).....	98
Fig 26 – a) e b) – Polarizadores de cubo.....	99
Fig 27 – Esquema experimental Aspect, Grangier e Dalibard (1982).....	101
Fig 28 – Esquema dos interruptores (switch).....	103

INTRODUÇÃO

Analizamos aqui a cultura material¹ (CM) dos primeiros experimentos com fótons óticos que testaram as desigualdades de Bell, i.e., os experimentos realizados por Freedman e Clauser (1972), Clauser (1976), Fry e Thompson (1976), Aspect, Grangier e Roger (1981), Aspect, Grangier e Roger (1982) e Aspect, Dalibard e Roger (1982) – exceto o realizado por Holt e Pipkin (1973) sobre o qual comentarei no capítulo 2. Nesta análise procuramos entender o que eram cada um dos aparatos (conceituando cada um deles da forma simples, evitando termos técnicos e específicos), como funcionavam (os processos de funcionamento e, em alguns casos, os princípios físicos envolvidos) e quais foram suas utilidades nos experimentos (seus papéis principais nestes experimentos, i.e., suas funções). Além disso, discutimos acerca das técnicas de excitação, detecção e contagem, utilizadas, ou seja, como ocorriam esses processos, os aparatos envolvidos e seus desenvolvimentos, bem como seus aperfeiçoamentos de um experimento para outro. Fizemos ainda uma análise histórica de alguns aparatos cruciais para a realização destes experimentos, indicando quando surgiram e, quando possível, como foi seu surgimento e quais pessoas estavam envolvidas. Restringimo-nos a descrever apenas os aparatos que estão citados nos artigos que descrevem os seus referidos experimentos, evitando algum equívoco relacionado a citar aparatos de outro tipo e/ou modelo, ou até mesmo que não foram utilizados.

Tomando por base a idéia de que existiu, entre as décadas de 1930 e 1960, um preconceito na comunidade de físicos contra temas relacionados à MQ (mecânica quântica)², surge uma questão: “Será que os experimentos aqui analisados nesta dissertação já poderiam ter sido realizados anteriormente?”. Para respondermos essa pergunta devemos verificar a partir de que data os aparatos utilizados nos experimentos já estavam disponíveis, desde quando as técnicas utilizadas estavam aperfeiçoadas a

¹ Cultura material são objetos criados pelo homem e que ele utiliza no seu cotidiano, os quais formam o ambiente concreto de certa sociedade. Discutiremos melhor sobre CM no tópico 1.3.

² In: Freire, 2006.

ponto de serem utilizadas com precisão nos experimentos (caso essas sejam procedimentos simples de serem realizados, não há necessidade dessa análise) e, por fim, se existia pessoal qualificado para realizar os experimentos. Outra questão a ser analisada é se anteriormente existiam recursos financeiros suficientes, bem como local apropriado, para realização dos experimentos, contudo esta análise foge aos objetivos da dissertação aqui apresentada, porém não deixa de ser uma possibilidade de trabalho futuro. Assim, buscamos aqui responder as seguintes perguntas: A partir de que data os aparatos necessários para realização dos experimentos estavam disponíveis? Desde quando as técnicas envolvidas foram aperfeiçoadas (a ponto de serem utilizadas com precisão nos experimentos em questão) ou se consistem de procedimentos simples? Caso consistam de procedimentos simples esta pergunta não se faz necessária. Para a primeira pergunta, esperamos que o estudo histórico dos aparatos, comentado no parágrafo anterior, nos indique quando surgiram os instrumentos utilizados nos experimentos. Quanto à segunda pergunta, uma análise das técnicas, juntamente com a análise dos instrumentos envolvidos, nos ajudará a responder se estas técnicas são compostas de procedimentos simples ou se, caso contrário existir uma técnica sofisticada, analisaremos quando foram desenvolvidas, se estão ligadas de alguma forma a algum aparato ou se foram aperfeiçoadas de um experimento para outro. Uma análise de pessoal qualificado já foi realizada anteriormente em Freire 2006, porém traçaremos um breve perfil dos autores dos experimentos, indicando sua formação e, quando possível, linha de pesquisa e motivação. Lembremos, entretanto, que o paradoxo EPR é de 1935 e que o conflito entre a mecânica quântica (MQ) e as teorias de variáveis ocultas locais (TVOL) só surgiu em 1965, com as desigualdades de Bell. Notemos então que no decorrer destes trinta anos não existiu um forte interesse na comunidade científica em temas relacionados a fundamentos de MQ pelo fato de se achar que este assunto já estava resolvido e não se tinha mais nada a discutir a respeito³. Uma data que tomaremos por base para a análise do surgimento dos instrumentos será à década de 1930, devido ao desenvolvimento do argumento EPR, já que foi

³ Freire 2006.

a primeira vez que a MQ foi questionada com relação a sua completude. Esse questionamento ulteriormente se transformou num impasse que foi parcialmente resolvido com a realização dos experimentos analisados na dissertação agora apresentada.

Buscamos também entender como a ciência se desenvolveu neste período e contexto. Para isto, analisamos como os experimentos foram se aperfeiçoando ao longo dos anos, comparando-os entre si. Esta comparação foi realizada através do estudo da CM dos experimentos – verificando se houve mudança nos aparatos – e da análise das técnicas de excitação, detecção e contagem utilizadas – discutindo as mudanças ocorridas de um experimento para outro. A tentativa de entender como a ciência se desenvolveu, neste período e contexto, possui um papel importante na História das Ciências (HC), já que um de seus principais objetivos é tentar entender o passado para melhorar, de alguma forma, o futuro. Para entender melhor o desenvolvimento da ciência, dentro desse período e contexto, é de suma importância entender o desenvolvimento desses experimentos. O estudo da CM e das técnicas de excitação, detecção e contagem utilizadas nos dá uma visão de como esses experimentos foram evoluindo ao longo dos anos. Outra importância do estudo aqui apresentado é que não conhecemos nenhum relato de estudo anterior da CM dos experimentos analisados na dissertação aqui apresentada.

Entender melhor como os instrumentos funcionam, bem como as técnicas (excitação, detecção e contagem) utilizadas, nos ajuda a entender melhor esses experimentos. Este entendimento pode ser utilizado no auxílio do processo de ensino-aprendizagem de alguns tópicos de MQ, como, por exemplo, emaranhamento, localidade e não-localidade, tópicos estes que são essenciais no entendimento dos fundamentos da MQ.

A dissertação agora apresentada está dividida em três capítulos. No primeiro destacaremos os fatos históricos mais importantes que estão relacionados à realização dos experimentos, discutiremos a metodologia utilizada e o referencial teórico. No segundo capítulo faremos uma análise

das técnicas, comentaremos brevemente sobre o perfil dos autores dos experimentos e discutiremos os resultados experimentais. O terceiro capítulo tratará da CM dos experimentos, bem como do estudo histórico dos aparatos. Deixaremos para discutir melhor o que será feito nos capítulos no início de cada um deles, quanto ao primeiro o faremos agora no próximo parágrafo.

1. UM POUCO DE HISTÓRIA, METODOLOGIA E REFERENCIAL TEÓRICO.

Este primeiro capítulo está dividido em três tópicos. No primeiro fizemos vôo panorâmico sobre a história da física, destacando os fatos mais importantes relacionados a esta pesquisa, buscando contextualizá-la na história. Partimos do surgimento da teoria quântica (TQ) – com a afirmação de Planck que a energia era quantizada – passando pelo debate entre Einstein e Bohr, o artigo EPR, a resposta de Bohr ao paradoxo EPR, a prova de Von Neumann, a contribuição de David Bohm, o teorema de Bell, o artigo CHSH até os experimentos que testaram as desigualdades de Bell. Sendo peça principal na controvérsia entre a teoria quântica e a teoria de variáveis ocultas locais – controvérsia esta que levou à realização dos experimentos – buscamos uma explicação mais detalhada do artigo EPR, afastando-nos do formalismo matemático e discutindo conceitualmente as idéias ali presentes. No segundo tópico comentamos sobre a metodologia utilizada. A saber, fizemos uma análise documental de fontes primárias, tivemos diversas discussões com um especialista em física experimental (Denis David) acerca da descrição dos aparatos e, por fim, fizemos um estudo histórico destes. No último tópico deste capítulo discutimos a abordagem histórica utilizada, ou seja, uma história dos instrumentos científicos (ou da instrumentação científica), abordagem essa relacionada às inovações introduzidas por Peter Galison na história da ciência com a idéia de CM.

1.1 Um pouco de história.

1.1.1 Um breve relato sobre a Mecânica Quântica.

Sabe-se que a teoria quântica (TQ) nasce com a idéia, introduzida por Max Planck em 1900, de que a energia é absorvida e reemitida em pequenos pacotes, idéia esta que atualmente chamamos de quantum de energia ou quantum de ação – nome introduzido pelo próprio Planck. Assim Planck resolve o problema da radiação do corpo negro, problema este que até então

não se tinha encontrado solução, apesar dos trabalhos realizados por Lord Rayleigh, James Jeans e Wilhelm Wien⁴. A solução deste problema foi apresentada numa conferência em Berlin, em 14 de dezembro de 1900, a qual foi fruto de seis anos de trabalho na busca de uma equação matemática que pudesse reproduzir os resultados experimentais que descreviam o comportamento da radiação do corpo negro⁵.

Posteriormente, muitos físicos se apoderaram da afirmação feita por Planck para explicar alguns fenômenos naturais – o que pouco a pouco confirmava a validade desta teoria. Podemos citar como exemplo, Einstein em 1905 com a explicação do efeito fotoelétrico, Niels Henrik David Bohr em 1913 quando postulou que o elétron circulando em torno de um núcleo atômico só emite ou absorve uma quantidade bem definida de energia, Artur Compton em 1923 quando explicou a variação do comprimento de onda dos raios X espalhados pela matéria, dentre outros.

Faz-se por bem agora comentar rapidamente a respeito do que chamamos velha teoria quântica e nova teoria quântica, já que usaremos estes termos posteriormente. A primeira é a família de resultados encontrados desde seu surgimento com Planck em 1900 até 1924-25, daí por diante chamamos nova teoria quântica. Um importante trabalho que ulteriormente se tornaria um marco entre a velha e a nova teoria quântica foi sobre a dualidade onda-partícula. Louis Victor Pierre Raymond (Príncipe de Broglie), um jovem estudante de doutorado, surpreenderia a comunidade científica daquela época ao defender a sua tese, em 1924. Em suma, esta tese partia do seguinte fato: se a luz, antes considerada como onda, tinha comportamento corpuscular, então o elétron, até então considerado como partícula, deveria ter também um comportamento ondulatório.

⁴ Para uma melhor explicação sobre os trabalhos de Rayleigh e Jeans e do trabalho de Wien ver Ribeiro Filho 2002, pp. 304-8.

⁵ Ribeiro Filho 2002, pp. 308, op. cit.

1.1.2 A Interpretação Probabilística.

A nova teoria quântica vem à luz estruturada matematicamente. Surgiram então as primeiras grandes teorias matemáticas da MQ: Heisenberg, com a formulação matricial, Schrödinger, com a mecânica ondulatória e Dirac, com a teoria das representações, são exemplos das formulações matemáticas mais conhecidas na comunidade de físicos⁶. Por outro lado, a chegada da nova teoria quântica também causou um impacto muito forte na comunidade científica, motivando assim longas discussões acerca de seus fundamentos. Uma das discussões mais acirradas nesta seara ocorreu entre Einstein e Bohr. Bohr defendeu uma interpretação da teoria quântica – atualmente chamada “interpretação de Copenhague” – que trazia um caráter probabilístico para os fenômenos da física atômica. Essa nova forma de interpretação dos fenômenos atômicos foi ponto crucial na motivação desse debate, pelo fato da aceitação do comportamento probabilístico da natureza implicar no abandono do determinismo. Einstein, por sua vez, não aceitava a idéia de abandono do determinismo, como ele mesmo expressa numa carta enviada para Max Born em quatro de dezembro de 1926: “Deus não joga dados com o universo”. Esta, ulteriormente, se tornaria uma de suas frases mais famosas, na qual externava sua objeção ao caráter probabilístico introduzido na física pela interpretação da escola de Copenhague. Conta-se que Bohr responde a frase de Einstein da seguinte forma: “Quem é você Einstein para dizer a Deus o que ele deve fazer?” Contudo, não temos nenhum registro desta frase.

A interpretação probabilística para as funções que são soluções da equação de Schrödinger, hoje conhecidas como “funções ψ ” ou “funções de onda”, surgiu em 1926. O significado apresentado por Max Born, em síntese, foi que o quadrado do módulo destas funções representa a probabilidade de obtermos os autovalores da equação de Schrödinger para a grandeza considerada. Numa formulação mais atual – nos permitindo aqui cometer o pecado do anacronismo – podemos dizer que a interpretação da equação de Schrödinger, no exemplo de um elétron, significa a probabilidade de

⁶Para um maior aprofundamento ver Ribeiro Filho 2002, pp. 331-42, op. cit.

encontrarmos, numa medida de posição, este elétron num ponto “x” ou nas suas vizinhanças ($x \pm \Delta x$). Max Born tinha plena consciência das implicações filosóficas de sua proposta, pois após cálculos em problemas de espalhamento ele mesmo escreveu (apud Freire 99, pp. 14 e 15):

“Aqui surge por inteiro o problema do determinismo. Do ponto de vista da nossa mecânica quântica não existe nenhuma quantidade que em qualquer caso individual fixe causalmente as conseqüências da colisão; mas também experimentalmente nós não temos até agora nenhuma razão para acreditar que existam algumas propriedades internas do átomo que condicionem um resultado definitivo para a colisão. Devemos desejar descobrir, ulteriormente, tais propriedades (como fases ou movimentos atômicos internos) e determiná-los em caso individuais? Ou devemos acreditar que a concordância da teoria e experimento – como a impossibilidade de prever condições para uma evolução casual – é uma harmonia pré-estabelecida fundada na não existência de tais condições? Eu próprio estou inclinado a abandonarmos o determinismo no mundo dos átomos. *Mas esta é uma questão filosófica para a qual argumentos físicos sozinhos não são decisivos*”.

Notamos claramente a posição de Max Born a favor do abandono do determinismo clássico. Apesar de Born ter escrito essas palavras em 1926, o primeiro indício da inclinação de Born para a interpretação probabilística da natureza surgiu em 1919, numa carta que Einstein envia para Born, posteriormente perdida, na qual Einstein faz uma piada que só faz sentido se o determinismo clássico estivesse sendo atacado⁷. Paul Forman acredita que esta é a primeira indicação de um possível caso de abandono do determinismo clássico (Forman 1983, pp61)⁸.

1.1.3 O Conselho Solvay de 1927.

Um marco na historia da física do século XX realmente foi o V conselho Solvay, realizado em Bruxelas, em 1927. Nele emerge com bastante clareza a controvérsia da mecânica quântica. As dificuldades no

⁷ Forman, 1983, pp. 61.

⁸ Forman, 1983, pp. 61.

entendimento da nova teoria e na interpretação formulada por Niels Bohr, e mesmo as resistências a ela, estavam centradas em duas exigências articuladas entre si: a manutenção do determinismo e a preservação de uma imagem nítida dos fenômenos físicos representados no espaço e no tempo. Nota-se que essas duas exigências eram satisfeitas por todas as teorias da física, inclusive a relatividade. A intervenção de Lorentz, então presidente do Conselho Solvay, é reveladora do surgimento dessas questões (apud Freire 99, pp16):

“Nós sempre quisemos, até aqui, formar as imagens das noções ordinárias de tempo e de espaço. Essas noções são, talvez, inatas. De todo modo elas se desenvolveram através de nossa experiência pessoal, em nossa observação quotidiana. Para mim essas noções são claras e confesso que não posso fazer uma idéia da física sem essas noções. A imagem que quero formar dos fenômenos deve ser absolutamente nítida e definida, e, me parece, que só podemos formar uma tal imagem no sistema do espaço e do tempo. (...) Ora penso que essa noção de probabilidade deveria ser colocada ao fim, e como conclusão das considerações teóricas, e não como axioma *a priori*, embora eu admita que esta indeterminação corresponde às possibilidades experimentais. Eu poderia sempre guardar minha fé determinista para os fenômenos fundamentais, dos quais eu não falei. Um espírito mais profundo não poderia dar conta dos movimentos desses elétrons? Não se poderia resguardar o determinismo fazendo-o objeto de uma convicção? É preciso, necessariamente, erigir o indeterminismo como princípio?”

A exigência de imagens nítidas espaços-temporais também estava presente na posição de Louis de Broglie, interpretando a função de onda como um campo físico conduzindo uma partícula (onda-piloto), e na tentativa de Schrödinger de interpretar esta mesma função como análoga a um campo eletromagnético.

Ainda no referido encontro, ocorreram diversas discussões entre Einstein e Bohr, relacionadas à controvérsia da mecânica quântica, sendo que, grandes partes destas não foram em sessões oficiais e sim

informalmente⁹. As objeções de Einstein, em 1927 e no período que se segue, eram, contudo, mais elaboradas que a simples exigência de imagens nítidas ou de preservação do determinismo. Embora ele tenha manifestado sua insatisfação com o formalismo matemático do espaço de configuração (espaço com dimensão mais elevada que o espaço tempo quadridimensional), suas principais restrições à nova teoria se concretizaram sempre em termos de experimentos de pensamento (*Gedanken experiment*), os quais buscavam compatibilizar a descrição no contínuo espaço-tempo e incompatibilizar às relações de indeterminação de Heisenberg com as previsões teóricas obtidas nesses experimentos de pensamento¹⁰. “Estes experimentos, e suas análises por Bohr, constituem parte essencial da matéria prima do que se denomina o debate Einstein versus Bohr” (Freire 1999, pp. 24).

1.1.4 O Artigo EPR.

O ponto culminante do debate entre Einstein e Bohr ocorreu oito anos depois do “V Encontro Solvay”, em forma de um artigo intitulado “*Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*”. Publicado na revista “Physical Review”, 47, pp. 777-780, 1935, por Einstein – juntamente com o ucraniano Boris Podolsky e o americano Nathan Rosen, colegas da faculdade de Princeton – este artigo (ulteriormente chamado EPR, representando as iniciais dos autores) atrairia a atenção de toda a comunidade científica daquela época, justamente pelo fato de colocar em cheque a Teoria Quântica. Através de um experimento de pensamento (*gedanken experiment*), o artigo EPR supostamente mostrava que a teoria quântica era uma teoria incompleta, apesar de não fazer referência a uma possível maneira de completá-la.

O argumento apresentado no artigo EPR contra a descrição quântica da realidade física fornecida pelas funções de onda tinha como alicerce a

⁹ In: Freire 1999, pp. 23.

¹⁰ In: Freire 1999, pp. 23-24.

condição de completude – para cada elemento da realidade física deve existir um elemento que o represente na teoria – e se consolidava em duas perguntas que os autores julgaram importantes para verificar o sucesso de uma teoria. A primeira delas é se “a teoria é correta” e a segunda é se “descrição fornecida pela teoria é completa”.

Para verificar se uma teoria é correta suas conclusões devem estar concordando com as experiências humanas. No campo da física essa verificação é feita através da experimentação, ou seja, da mensuração. Contudo, esta primeira pergunta não foi levada em consideração pelos autores para a construção de seus argumentos, provavelmente devido ao fato desses experimentos (com o objetivo de testar a TQ) ainda não terem sido realizados. Todo argumento foi desenvolvido considerando apenas a segunda pergunta – para que uma teoria seja considerada completa deve satisfazer a condição de completude. Notemos que a condição de completude é condição necessária, mas não suficiente, para que uma teoria seja considerada completa.

1.1.5 A primeira afirmação feita no artigo EPR.

Na teoria quântica quando se conhece o momentum de uma partícula, numa certa direção, sua coordenada não tem realidade física¹¹. O conceito de realidade dada pelos autores do artigo EPR é que: “se, sem de modo algum perturbar o sistema, pudermos prever com certeza (ou seja, com probabilidade igual a um) o valor de uma quantidade física, então existe um elemento de realidade física correspondente a esta quantidade física”. Este conceito não esgota as maneiras de se reconhecer uma realidade física, mas fornece uma dessas maneiras e, em certas condições específicas, está em concordância tanto com as idéias clássicas de realidade como com as idéias quânticas. De forma mais geral, demonstra-se que na TQ o conhecimento preciso de uma grandeza implica na indeterminação da outra (para o caso de

¹¹ Esta afirmação esta baseada no princípio da incerteza de Heisenberg.

grandezas canonicamente conjugadas, como posição e momentum, energia e tempo, etc), mais ainda, qualquer tentativa de determinar experimentalmente uma grandeza altera o estado da outra.

A primeira afirmação feita no artigo EPR é que: ou essas duas quantidades físicas não podem ter realidades físicas simultâneas, ou então à descrição quântica da realidade, fornecida pela função de onda, não é completa. Para melhor ilustrar as idéias contidas neste artigo, citemos o exemplo de duas partículas emitidas de um mesmo decaimento em cascata (também chamado de decaimento rápido, como por exemplo, os decaimentos nos átomos de cálcio e mercúrio que veremos no capítulo 2). Para a teoria quântica se essas duas partículas forem afastadas por certa distância e efetuarmos uma medida do momentum de uma dessas partículas, isso modifica o resultado da medida do momentum da outra partícula – essa idéia é hoje conhecida como não localidade. A idéia de localidade é justamente o contrário, efetuando-se uma medida do momentum em uma partícula (para o exemplo acima) não modifica o resultado da medida da outra. Notemos que a idéia de não localidade leva a uma conjectura, a saber, a possibilidade de ferir a teoria da relatividade. Caso a distância entre as partículas seja muito grande, surge a possibilidade de um sinal supra-luminoso. Nesta situação, já que a medida em um sistema interfere instantaneamente em outro, e a distância entre eles é muito grande, o sinal que um sistema envia para o outro pode ter velocidade maior que a da luz¹².

1.1.6 A segunda afirmação feita no artigo EPR, o paradoxo e a conclusão dos autores.

Quando se considera que a função de onda fornece uma descrição completa da realidade, dentro do contexto das idéias discutidas no artigo, surge uma contradição. Para melhor explicá-la tomemos outro exemplo: consideremos que dois sistemas, I e II, interagem num tempo T e após findar

¹² Hoje sabemos que este sinal é impossível. Para uma explicação desta impossibilidade, ver Pessoa Jr. V2, 2006, pp. 292-3.

este tempo não interagem mais e consideremos ainda que as autofunções que descrevem os dois sistemas, antes de interagir, são conhecidas. Pela equação de Schrödinger podemos calcular o estado do sistema combinado $I + II$ em qualquer tempo $t < T$, contudo, não podemos calcular o estado de qualquer um dos dois sistemas separadamente, a não ser por um processo conhecido como “redução do pacote de onda” ou “colapso da função de onda”¹³. Neste processo, por exemplo, se um sistema qualquer antes da medida é descrito pela superposição de dois auto-estados Ψ_1 e Ψ_2 , $\Psi = C_1\Psi_1 + C_2\Psi_2$ onde C_1 e C_2 são as amplitudes complexas, sendo $\sum |C_i|^2 = 1$ ¹⁴, após a medida o sistema se reduz a um dos dois estados Ψ_1 ou Ψ_2 , fala-se de colapso da função de onda. Retomando o exemplo anterior, em consequência de uma medida executada sobre I , o sistema II pode ter duas funções de ondas diferentes. Por outro lado, já que no momento da medida os sistemas não estão mais interagindo, não deve ocorrer nenhuma mudança real em II , em decorrência de qualquer alteração que se faça em I . Logo, é possível atribuir duas funções de onda diferentes à mesma realidade física.

Retomemos a primeira afirmação feita pelos autores do artigo EPR: “ou a descrição quântica da realidade fornecida pela função de onda não é completa ou essas quantidades físicas não podem ter realidades físicas simultâneas”. Ora, partindo da suposição de que a função de onda fornece uma descrição completa da realidade, os autores mostram no referido artigo que podem existir realidades físicas simultâneas para essas duas grandezas, descortinando assim o paradoxo. Então, com as próprias palavras dos autores: “Somos assim forçados a concluir que a descrição quântica da realidade física através das funções de onda não é completa”. Desta forma é finalizado o artigo, concluindo-se que a teoria quântica é uma teoria incompleta. Os autores não discutem sobre a existência ou não de uma descrição completa da teoria quântica, deixando esta questão em aberto.

¹³ Não pretendo aqui explicar minuciosamente este processo e sim exemplificá-lo de forma simples. Para um maior entendimento ver Pessoa Jr, V1, 2005, Cap. VI.

¹⁴ $\sum |C_i|^2 = 1$ significa dizer que a função é normalizada, i.é., a probabilidade total é igual a um.

Contudo, eles acreditavam que esta descrição era possível. Essa descrição foi posteriormente chamada de “variáveis ocultas” ou “variáveis adicionais”.

Realmente, o argumento apresentado no artigo EPR é belíssimo, no contexto das idéias da época. Recordando as palavras do professor Michel Paty, num seminário apresentado na UFBA em 2007, entendo melhor quando ele afirmou que “Einstein é um dos cientistas mais brilhantes de todos os tempos”. Apesar do brilhantismo das idéias apresentadas no EPR, sessenta anos depois da publicação do artigo, o próprio Nathan Rosen publica outro artigo intitulado “*Some Reflections on the EPR Work*” no qual, após apresentar a idéia central e, como o próprio título sugere, algumas reflexões do artigo EPR, ele se convence que uma teoria completa no senso do EPR não é possível, ou seja, a descrição que ele, juntamente com Einstein e Podolsky, acreditavam que era possível, não é (Rosen, 1996).

1.1.7 A resposta de Bohr ao artigo EPR.

A resposta dada por Bohr também veio em forma de artigo, publicado no mesmo ano e com o mesmo título do artigo publicado por Einstein, Podolsky e Rosen. No primeiro parágrafo do artigo Bohr advoga que a argumentação apresentada no artigo EPR não parece lidar adequadamente com a situação real que eles se defrontavam na física atômica. Bohr usa a idéia de complementaridade para afirmar que “... a mecânica quântica, em seu domínio, se mostraria com uma descrição completamente racional dos fenômenos físicos, como os que encontramos nos processos atômicos...” (Bohr, 1935). Uma melhor explicação deste artigo é encontrada em Freire 1999, pp28:

“O texto da resposta de Bohr não é de fácil compreensão, mas não inclui nenhum elemento conceitual externo à teoria quântica. Ele usa os teoremas de transformação próprios do formalismo matemático da teoria para mostrar que a função de onda adotada por Einstein para descrever as duas partículas corresponde às condições experimentais equivalentes a um arranjo que ele (Bohr) passa a examinar. O arranjo em tela é um

diafragma rígido, com duas fendas paralelas pelas quais passam duas partículas. Ele mostra que, neste arranjo, medir a posição da primeira partícula implica em obter sem medição a posição da segunda partícula, mas implica também numa interação (troca de momento) com o diafragma (dispositivo experimental) que impediria o conhecimento ulterior do momento seja da primeira ou da segunda partícula. E inversamente, um dispositivo experimental adequado à medição do momento, acarretaria interações que impediriam o ulterior conhecimento da posição”.

A dificuldade na compreensão deste artigo foi reconhecida pelo próprio Bohr, quatorze anos depois, nas suas próprias palavras: “Relendo essas passagens eu estou profundamente consciente da ineficiência de expressão...” (apud Freire 1999, p28).

Na formulação deste artigo Bohr usa a noção de fenômenos quânticos se referindo à totalidade dos sistemas atômicos ou moleculares e mais as condições experimentais adequadas e necessárias ao seu estudo. Com esse conceito, ele situa a análise dessas condições experimentais no objeto da própria teoria quântica, definindo então o significado da noção de realidade física incluindo as condições da medição, nessa teoria. A noção de fenômeno quântico como expressão do objeto na teoria quântica é um desenvolvimento de idéias já presentes em sua argumentação. Para ele, no âmbito da teoria quântica, não se fazem perguntas sobre as propriedades de uma partícula isolada, devido à finitude do quantum de ação, mas só perguntamos pelas propriedades da partícula em determinadas situações experimentais ou determinadas interações. Bohr acreditava que a separação de duas partículas que haviam interagido não as tornavam completamente independentes. As partículas que interagiam e se separavam não podiam ser consideradas independentes porque não se podia atribuir a elas propriedades que podiam ser definidas independentemente¹⁵.

¹⁵ Parágrafo baseado em Freire 1999.

1.1.8 David Bohm e sua participação na controvérsia.

David Bohm quando publica sua obra “*Quantum Theory*”, em 1951, propõe uma mudança no experimento de pensamento apresentado no artigo EPR, a qual consistia, em suma, de utilizar componentes de spin de duas partículas correlacionadas, ao invés de momentum – como era sugerido no artigo EPR. Essa mudança trouxe grande simplicidade matemática à descrição teórica do experimento, além de ter sido utilizado por Bell no desenvolvimento de um dos teoremas mais importantes para a pesquisa em fundamentos da MQ, hoje denominado “Desigualdades de Bell”. Devido a esta colaboração alguns autores – como, por exemplo, Aspect, Grangier e Roger – incluem o nome de David Bohm no experimento de pensamento EPR, denominando-o “experimento de pensamento de Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm”¹⁶.

Assim que Bohm concluiu o referido livro, ele o enviou a Wolfgang Pauli – que o respondeu elogiando o conteúdo –, a Bohr – que por sua vez não o respondeu –, e também a Einstein – que, apreciando o tema, o convidou para discussões sobre o assunto. Essas discussões, juntamente com as críticas de físicos soviéticos – como Blokhintsev e Terletski – a interpretação da complementaridade, motivaram Bohm a buscar uma nova abordagem para estes problemas. Ele então elaborou a proposta de reinterpretação da teoria quântica através de dois artigos intitulados “*A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of ‘Hidden Variables’ – I & II*”, em 1952. Esses dois artigos tratam, basicamente, de um modelo físico capaz de reproduzir todos os resultados que podem ser obtidos pela teoria quântica. Para Bohm a interpretação proposta por ele leva aos mesmos resultados que a interpretação usual, para a teoria quântica não relativística. Isto é obtido através do auxílio de variáveis adicionais (*hidden variables*) – ou também variáveis escondidas – que tornam possível uma descrição contínua, detalhada e causal de todos os processos, o que traz uma recuperação do determinismo e das trajetórias próprias da física clássica. Bohm também argumenta que “a formulação matemática usual

¹⁶ In Aspect, Grangier and Roger 1982, pp. 91.

parece levar a dificuldades insolúveis quando ela é extrapolada para o domínio de distâncias da ordem de 10^{-13}cm ou menos” (apud. Freire 1999, pp. 50). Notemos que o argumento de Bohm é fortíssimo, pois se os mesmos problemas insolúveis não ocorrem com a interpretação sugerida por ele, esta poderia ser necessária para resolução destes problemas. O próprio John Bell ulteriormente afirmou que o artigo de Bohm [de 1952] foi uma revelação para ele, pois ele viu o impossível ser feito¹⁷, contudo, os trabalhos de Bohm não tiveram uma aceitação na comunidade científica a ponto de levar ao abandono da interpretação usual¹⁸, a qual já estava bem estabelecida naquela época.

Anteriormente, Louis de Broglie tinha tentado uma interpretação bastante semelhante à de Bohm. A descrição feita por de Broglie, assim como a de Bohm, era causal e também introduzia variáveis adicionais, além dos modelos serem bem assemelhados. Contudo, de Broglie havia desistido deste programa. Bohm não conhecia os trabalhos prévios de de Broglie quando desenvolveu suas idéias. Quando o trabalho de Bohm começou a circular surgiram os primeiros sinais de uma disputa por prioridades. de Broglie enviou um comunicado à “Académie des Sciences” (Academia de ciências de Paris) lembrando dos seus trabalhos anteriores e Wolfgang Pauli confirmou a prioridade dos trabalhos de de Broglie em uma carta a Bohm, mas este não se convenceu facilmente e respondeu a Pauli da seguinte forma: “se um homem encontra um diamante e em seguida abandona-o, porque ele conclui, erroneamente, que a pedra é sem valor e se esta mesma pedra é encontrada mais tarde por um outro homem que reconhece seu verdadeiro valor, você não diria que a pedra pertence ao segundo homem? Eu penso que o mesmo raciocínio se aplica à interpretação da física quântica”. Apesar de ter resistido no início, quando os artigos de Bohm foram publicados o mesmo reconheceu a prioridade dos trabalhos de de Broglie¹⁹.

¹⁷ In Freire 2006, pp. 580.

¹⁸ Este assunto está bem discutido em Freire Jr 1999 e Freire Jr 2005, pp. 1-34.

¹⁹ In: Freire 1999, pp. 51.

1.1.9 A prova de von Neumann.

Antes dos trabalhos de Bohm, já existiam provas matemáticas contra as teorias de variáveis ocultas. A prova mais aceita pelos físicos daquela época, foi a do matemático John von Neumann, a qual impossibilitava a existência das variáveis adicionais às adotadas pela mecânica quântica. Este trabalho, intitulado “*Os fundamentos matemáticos da mecânica quântica*”, foi desenvolvido em 1932 e atualmente é conhecido como “a prova de von Neumann”. Von Neumann passou a dar um tratamento matemático ao problema dos parâmetros adicionais para poderem determinar precisamente os resultados de medições da teoria quântica. Ele concluiu, através de um famoso teorema, que havia uma impossibilidade de uma teoria de variáveis adicionais poder fazer tal representação. Outros argumentos ou provas foram desenvolvidos, mas a prova de von Neumann teve maior repercussão entre a comunidade dos físicos. Contudo, Bohm consegue ressuscitar um modelo baseado em variáveis adicionais e consegue reproduzir os resultados obtidos pela teoria quântica, o que anteriormente era impossível se tomássemos por base a prova de von Neumann. Bell posteriormente aponta que a prova de von Neumann não era tão poderosa quanto parecia²⁰, pois uma das hipóteses da prova era satisfeita para estados quânticos, mas não era necessariamente satisfeita no campo das teorias de variáveis adicionais²¹.

1.1.10 As desigualdades de Bell.

John Stuart Bell, norte irlandês nascido em Belfast em 1928²², terminou seu primeiro trabalho sobre os fundamentos da mecânica quântica em meados de 1964. Esse trabalho era uma resenha sobre as diferentes provas de impossibilidade de teorias de variáveis adicionais, intitulada “*On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics*”. A última versão deste

²⁰ In Pessoa 2006, pp. 231.

²¹ Para uma melhor compreensão sobre as teorias de variáveis adicionais locais, ver Pessoa 2006, cap.XXIV.

²² http://en.wikipedia.org/wiki/John_Stuart_Bell, Wikipédia, acessado em março de 2007.

artigo foi enviada para o *Reviews of Modern Physics*, o qual foi erroneamente arquivado, sendo publicado dois anos depois, em 1966. Bell mostrou que a prova de impossibilidade apresentada por von Neumann continha uma hipótese muito restrigente, não sendo necessariamente satisfeita para a teoria de variáveis adicionais, conforme já apresentamos no tópico anterior. Isso tornava a teoria de Bohm imune não só a prova de von Neumann, mas também a outras provas existentes, como por exemplo a de Gleason e também a de Kochen-Specker²³.

Bell reescreve uma equação conhecida como equação de de Broglie-Bohm²⁴, para um par de partículas com spins correlacionados, as quais formam um sistema de equações acopladas, exibindo assim um caráter não local. Bell então considerou que, se a função de onda fosse inicialmente fatorável, esta fatorabilidade traria a situação de que o estado de uma das partículas seria independente do estado da outra, o que representa a idéia de localidade, ou separabilidade. Em geral a função de onda não é fatorável, o que faz com que a teoria de Bohm tenha um caráter causal, ou seja, a disposição em uma parte do aparelho afeta os resultados obtidos em outra parte distante. Bell então conclui que uma explicação da mecânica quântica à luz de uma teoria de variáveis ocultas não, necessariamente, precisa ter um caráter não local, e que seria interessante procurar alguma forma de impossibilidade adicional²⁵.

Posteriormente o próprio Bell, em 1964, derivou uma de suas desigualdades que seria satisfeita por quaisquer teorias de “variáveis ocultas locais” – teorias que satisfazem a condição de localidade – obtendo um resultado surpreendente, a saber, esta desigualdade, em certas circunstâncias, i.e, para ângulos específicos, era violada pela mecânica quântica. Esse resultado mostra uma incompatibilidade entre a mecânica quântica e quaisquer teorias de variáveis ocultas locais (TVOL),

²³ Para um maior aprofundamento ver Bell, J. S. 1966 e/ou Pessoa 2006, pp. 251-6.

²⁴ Sobre esta equação ver Pessoa 2006, pp. 235, op. cit. nota 17.

²⁵ In: Bell, 1966, pp. 452.

incompatibilidade esta que atualmente é conhecida como “Teorema de Bell”²⁶.

O teorema de Bell, também chamado “desigualdade de Bell”, é uma família de resultados matemáticos que mostra que as previsões experimentais fornecidas pela TQ não estão de acordo com as fornecidas pela TVOL. A desigualdade apresentada por Bell²⁷ foi à seguinte:

$$|1 + P(b,c) \geq |P(a,b) - P(a,c)|$$

Onde $P(a,b)$, $P(a,c)$ e $P(b,c)$ são as funções de correlação entre as duas partículas em várias orientações dos detectores, i.e, uma média dos produtos das medições realizadas nas duas partículas²⁸ e ‘a’, ‘b’ e ‘c’ são versores.

Faremos agora uma demonstração simplificada das desigualdades de Bell²⁹.

Consideremos o experimento de pensamento EPR – com a modificação proposta por Bohm (discutida anteriormente no tópico 1.1.8) de utilizar variáveis bivalentes como, por exemplo, spin – onde uma fonte emite duas partículas, um elétron e um pósitron. Realizam-se várias medidas de spin do elétron e do pósitron, onde os possíveis resultados são +1 ou -1, se multiplicarmos esses resultados obteremos os valores dos produtos das medidas, conforme tabela abaixo:

Elétron	Pósitron	Produto
+1	-1	-1
+1	+1	+1

²⁶ Sobre as desigualdades de Bell ver Bell 1964, Freire 1991, Pessoa 2006 Cap. XXVII e Cap. XXVIII.

²⁷ In: Bell, 1964, pp. 406.

²⁸ Ribeiro Filho, A. Notas de Aula, curso ministrado para alunos de Pós-Graduação da Universidade Federal da Bahia no segundo semestre de 2008.

²⁹ Esta demonstração está baseada nas notas de aula do professor Aurino Ribeiro Filho, op cit nota 22. Outras demonstrações podem ser encontradas em Pessoa 2006 cap XVII e cap XVIII, Freire 1991, Clauser and Shimony 1978, CHSH 1969 e no próprio trabalho de Bell 1964.

-1	+1	-1
+1	-1	-1
-1	-1	+1
...

Bell propôs que, ao invés de orientar o elétron, os detectores e o pósitron na mesma direção, os detectores girassem independentemente e sugeriu calcular o valor médio dos produtos dos spins, chamando-os de $P(a,b)$. O detector D1 mede o componente de spin do elétron na direção do versor “a”, o detector D2 mede o componente de spin do pósitron na direção do versor “b”. Se os detectores (D1 e D2) estiverem paralelos entre si teremos um spin “up” e um spin “down”, logo o produto entre eles será sempre -1, consequentemente a média também será -1: $P(a, a) = -1$. Se os detectores forem antiparalelos (ou perpendiculares) o produto será +1, sendo assim a média dos produtos será: $P(a, -a) = +1$.

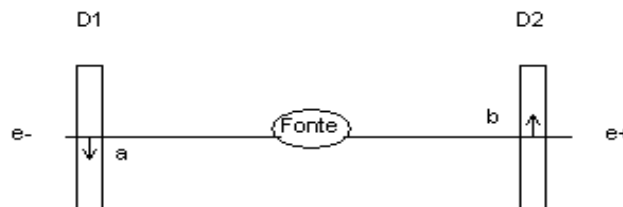


Fig 1: Versão de Bell do experimento EPRB. Detectores independentes, paralelos entre si, orientados nas direções “a” (spin down) e “b” (spin up).

Considerando que o estado completo do sistema é caracterizado pelas variáveis escondidas (λ) e que o resultado da medida realizada numa partícula não depende da medida na outra, então existe uma função $A(a,\lambda)$ que dá o resultado da medida realizada no elétron e $B(b,\lambda)$ que dá o resultado da medida no pósitron: $A(a,\lambda) = \pm 1$ e $B(b,\lambda) = \pm 1$. Se os detectores estiverem antiparalelos ($b = -a$) teremos $A(a,\lambda) = -B(a,\lambda)$ ou $B(b,\lambda) = -A(b,\lambda)$, qualquer que seja λ .

A média dos produtos das medidas será $P(a,b) = \int \rho(\lambda) A(a,\lambda) B(b,\lambda) d\lambda$, onde $\rho(\lambda)$ é a densidade de probabilidade para a variável escondida.

Aplicando $B(b,\lambda) = -A(b,\lambda)$ em $P(a,b) = \int \rho(\lambda) A(a,\lambda) B(b,\lambda) d\lambda$ temos:

$$P(a,b) = - \int \rho(\lambda) A(a,\lambda) A(b,\lambda) d\lambda.$$

Sendo “c” qualquer outro versor temos: $P(a,c) = - \int \rho(\lambda) A(a,\lambda) A(c,\lambda) d\lambda$.

$$\text{Assim, } P(a,b) - P(a,c) = - \int \rho(\lambda) [A(a,\lambda) A(b,\lambda) - A(a,\lambda) A(c,\lambda)] d\lambda.$$

$$P(a,b) - P(a,c) = - \int \rho(\lambda) [A(b,\lambda) - A(c,\lambda)] A(a,\lambda) d\lambda.$$

Sendo $[A(b,\lambda)]^2 = 1$, temos:

$$P(a,b) - P(a,c) = - \int \rho(\lambda) [1 - A(b,\lambda) A(c,\lambda)] A(a,\lambda) A(b,\lambda) d\lambda.$$

Como $A(a,\lambda) = \pm 1$ e $B(b,\lambda) = \pm 1$, $-1 \leq [A(a,\lambda) A(b,\lambda)] \leq +1$,

então, $\rho(\lambda) [1 - A(a,\lambda) A(c,\lambda)] \geq 0$.

Assim podemos dizer que $|P(a,b) - P(a,c)| \leq \int \rho(\lambda) [1 - A(b,\lambda) A(c,\lambda)] d\lambda$,
ou $|P(a,b) - P(a,c)| \leq \int \rho(\lambda) d\lambda - \int A(b,\lambda) A(c,\lambda) d\lambda$.

Como $\int \rho(\lambda) d\lambda = 1$ e $\int A(b,\lambda) A(c,\lambda) d\lambda = P(b,c)$,

temos $|P(a,b) - P(a,c)| \leq 1 + P(b,c)$, ou também

$\boxed{1 + P(b,c) \geq |P(a,b) - P(a,c)|}$, que é a desigualdade de Bell apresentada anteriormente.

Lembremos que essas desigualdades supõem a existência de variáveis ocultas locais, i.e, variáveis que obedecem à condição de localidade (a medida realizada sobre uma partícula não altera o estado da outra partícula, estando essas separadas espacialmente). O que Bell mostrou foi que as previsões da MQ violam essas desigualdades, logo há uma incompatibilidade de resultados entre as previsões teóricas da MQ e das TVOL. Vale ressaltar que as maiores violações ocorrem para os ângulos “ φ ” (ângulo entre o plano de polarização e a orientação definida nos

polarizadores) de $27,5^\circ$ e $67,5^\circ$, sendo que para os ângulos de 0° , 90° , 180° e 270° não ocorrem violações.

Clauser ulteriormente afirmou que o teorema de Bell foi um dos resultados mais profundos do século XX³⁰.

1.1.11 Uma possível solução para o impasse.

Uma possível solução para resolver esse impasse existente entre a TQ e quaisquer TVOL surgiu em 1969 quando Clauser, Horne, Shimony e Holt publicaram um artigo, hoje conhecido por CHSH (também por causa das iniciais dos nomes dos autores) intitulado “*Proposed Experiment to Test Local Hidden Variable Theories*” publicado na revista Phys.Rev.Let., 23, 880-884 (1969). Este artigo trazia consigo a proposta de um experimento realizável para testar as desigualdades de Bell. Esta proposta está apoiada em dois pilares. A saber, a generalização das desigualdades de Bell – generalização esta feita pelos próprios autores neste referido artigo – e de uma modificação no experimento realizado por Kocher e Commins, realizado em 1967³¹, modificação esta que passava a abranger os ângulos que ocorriam maior violação das desigualdades de Bell, já que para os ângulos usados no experimento a referida violação não ocorria. O artigo CHSH foi de suma importância para o desenvolvimento da ciência naquela época, isto por que, além de ter sido a primeira proposta concreta de realização de um experimento que pudesse testar as desigualdades de Bell, foi a fonte principal de estímulo para o surgimento dos primeiros experimentos deste tipo. Esses experimentos só começaram a surgir dois anos depois da publicação deste artigo³².

³⁰ In: Clauser 2002, pp. 61.

³¹ Kocher and Commins 1967.

³² Antes da realização destes experimentos já se tinham alguns resultados empíricos relacionados ao experimento EPR. Para alguns destes resultados e/ou maior aprofundamento neste assunto ver Freire 1999, pp. 140-1.

1.1.12 Buscando uma visão.

Este vñ panorâmico sobre a história da física do século XX que apresentamos nesta primeira secção deste capítulo nos mostra duas coisas. A primeira é que todos os fatos aqui citados influenciaram, de alguma forma, na realização desses experimentos. A segunda é que nos dá uma visão – mesmo que superficial – do desenvolvimento da ciência naquele período e contexto. Buscando uma visão mais apurada, é de suma importância tentar entender como a ciência se desenvolveu, para que possamos aplicar este entendimento a progressos futuros – já que este é um dos papéis principais dos *“history of science’s students”*. Peter Burke acredita que *“cada geração, vivendo com os problemas do presente, interroga o passado pensando em suas próprias questões. Por isso é importante reescrever a história a cada geração”* ³³. Indo mais a fundo, digo que o objetivo de aplicar estudos passados a progressos futuros é de se construir um mundo melhor de se viver. Se a pesquisa aqui apresentada não tivesse como pano de fundo um objetivo de tentar trazer algo de bom para o mundo, ela se perderia no seu contexto. Logo, se faz necessário um estudo mais aprofundado e consistente dos experimentos citados. Nesta seara, um estudo baseado na cultura material dos experimentos que testaram as desigualdades de Bell é bastante apropriado, pois focaliza o que os experimentos têm de mais forte, a instrumentação, além de fazer uma intersecção entre estes instrumentos e a investigação histórica.

Os experimentos analisados nesta dissertação não foram os últimos testes da TQ. Posteriormente, outros experimentos, cada vez mais sofisticados, foram realizados, buscando testar de várias formas diferentes essa teoria. Como exemplo destes novos testes, podemos citar os realizados por: Ou e Mandel em 1988 (Phy. Rev. Let. V.61, N1); Shih e Alley também em 1988 (Phy. Rev. Let. V.61, N26); Tapster, Rarity e Owens em 1994 (Phy. Rev.

³³ in: http://oglobo.globo.com/blogs/prosa/post.asp?cod_post=186814, acessado em 16/05/2009. Entrevista concedida no final do ano passado durante o seminário Comunicação e História, realizado pela Escola de Comunicação da UFRJ com apoio do Globo Universidade. Peter Burke.

Let. V.73, N14); Tittel, Brendel, Zbinden e Gisin em 1998 (Phy. Rev. Let. V.81, N17); J. Barrett, D. Collins, L. Hardy, A. Kent, and S. Popescu em 2002 (Phys. Rev. A 66, 042111); A. Kent em 2005 (Phys. Rev. A 72, 012107); J. Barrett, A. Kent, and S. Pironio em 2006 (Phys. Rev. Lett. 97, 170409); C. Branciard, A. Ling, N. Gisin, C. Kurtsiefer, A. Lamas-Linares, and V. Scarani em 2007 (Phy. Rev. Let. 99, 210407); S. Gröblacher, T. Paterek, R. Kaltenbaek, C. Brukner, M. Żukowski, M. Aspelmeyer, and A. Zeilinger em 2007 (Nature 446, 871); T. Paterek, A. Fedrizzi, S. Gröblacher, T. Jennewein, M. Żukowski, M. Aspelmeyer, and A. Zeilinger em 2007 (Phy. Rev. Let 99, 210406) e Roger Colbeck e Renato Renner em 2008 (Phy. Rev. Let. PRL 101, 050403). Até os dias atuais a TQ ainda é testada, saber por que é uma pergunta que foge dos objetivos desta pesquisa, sendo uma possibilidade de trabalhos futuros. Vale ressaltar que esses testes experimentais da TQ estão relacionados com a pesquisa em criptografia quântica – bem como em computação quântica – já que estas áreas convergem no estudo da polarização de fótons emaranhados, como por exemplo, no sistema de criptografia quântica baseado na polarização desses fótons emaranhados, anteriormente realizado por Jennewein, Simon, Weihs, Weinfurter and Zeillinger³⁴.

1.2 Metodologia

O presente trabalho é um aprofundamento e continuação de uma pesquisa de iniciação científica (IC) desenvolvida por mim, no período de agosto de 2005 a julho de 2006, intitulada *“A cultura material da física: uma análise dos primeiros experimentos que testaram as desigualdades de Bell”*, sob orientação de Olival Freire Júnior. Nesta IC analisamos a cultura material dos experimentos realizados por Freedman & Clauser (1972), Clauser (1976) e Fry & Thompson (1976). Fizemos também um estudo de quando surgiram o circuito de coincidência e o fototubo – aparatos cruciais para a confecção dos experimentos – com o intuito de responder a seguinte pergunta: “Será

³⁴ Thomas Jennewein, Christoph Simon, Gregor Weihs, Harald Weinfurter and Anton Zeilinger, *“Quantum Cryptography with Entanglement Photons”*, Physical Review Letters, V.84, N.20, 4729-32, (2000).

que estes experimentos poderiam ter sido realizados anteriormente?”. Esta pergunta foi sugerida por Olival Freire Jr, orientador da IC em questão. A análise da CM dos experimentos, na IC supracitada, nos indicou que os aparatos cruciais – circuito de coincidência e fototubo, ambos de 1930 – para a realização dos dois primeiros experimentos – Freedman & Clauser (1972) e Clauser (1976) – já estavam disponíveis desde 1930 (Bispo 2006). Contudo para responder a pergunta inicial precisaríamos fazer uma análise mais profunda dos aparatos englobando todos os instrumentos, além de uma análise das técnicas utilizadas nos referidos experimentos.

Manteremos o mesmo fio condutor, como metodologia, da iniciação científica supracitada, analisando o que eram os aparatos, como funcionavam e quais seus papéis principais nos experimentos, mantendo também o estudo histórico de alguns dos aparatos cruciais na confecção dos experimentos. Contudo, no trabalho aqui apresentado, aprofundamos no estudo da cultura material dos instrumentos, explicando mais detalhadamente cada um dos aparatos e acrescentando outros ao estudo histórico, além de incluir os experimentos realizados por Aspect, Grangier e Roger (1981), Aspect, Grangier e Roger (1982) e Aspect, Dalibard e Roger (1982). Também acrescentamos um estudo das técnicas de excitação, detecção e contagem, utilizadas em cada um desses experimentos, bem como seus desenvolvimentos.

Inicialmente fizemos uma análise documental dos artigos que descrevem os experimentos, buscando maior familiaridade com estes e seus instrumentos, analisando os aparatos conforme eram apresentados nestes artigos e retirando todo tipo de informação possível que pudesse ajudar a responder as seguintes perguntas: O que eram os aparatos? Como funcionavam? Quais suas funções nos experimentos? Quando estes surgiram? Esses experimentos já poderiam ter sido realizados anteriormente?

A análise documental é uma técnica de pesquisa que visa o acesso às fontes pertinentes, com o intuito de recolha e verificação de dados, fazendo

assim parte da heurística da investigação (Saint-Georges, 1997: 30)³⁵. Esta técnica é decisiva na pesquisa em ciências sociais e humanas, já que extrai das fontes (primárias e secundárias) toda a análise necessária, organizando e interpretando conforme objetivo da pesquisa (Pimentel, 2001)³⁶. Ela também possibilita, a partir de dados passados, perspectivar o futuro e, a partir deste, compreender seus antecedentes, numa espécie de reconstrução (Cohen e Manion, 1990)³⁷.

Na pesquisa aqui apresentada, este método é indispensável, pois as fontes primárias (os artigos que descrevem os experimentos) são a base desta investigação. As fontes documentais são classificadas como primárias e secundárias. As primeiras enquanto fontes de época, i.e., todos os artigos, livros, cartas e etc, que foram publicados naquele referido período. As segundas como fontes interpretativas baseadas nas primeiras, i.e, publicados posteriormente³⁸.

A pesquisa documental tem como suporte a crítica histórica, sobretudo seus métodos de investigação, que, segundo Cohen e Manion (1990), se desenvolvem em duas etapas conhecidas como crítica externa e crítica interna. Na primeira valoriza-se a autenticidade das fontes, buscando a genuinidade e veracidade dos documentos, enquanto que na crítica interna avalia-se a precisão ou valor dos documentos, sujeitando-o a uma análise rigorosa baseada em perguntas pertinentes à história e forma do documento³⁹.

Após a análise documental das fontes primárias confeccionamos uma lista constando todos os aparatos dos experimentos, para servir como guia no estudo da cultura material de cada um dos instrumentos. Vale ressaltar que só foram relacionados os aparatos que são citados nos artigos, evitando possíveis equívocos relacionados a citar aparatos de outros tipos e/ou

³⁵ Saint-Georges 1997. Apud in: <http://educaaic.blogspot.com/2006/10/como-fazer-analise-documental.html>, em 28/05/08.

³⁶ Pimentel 2001.

³⁷ COHEN, L. & MANIO, N, L. (1990).

³⁸ In: <http://educaaic.blogspot.com/2006/10/como-fazer-analise-documental.html>, em 28/05/08.

³⁹ In: <http://educaaic.blogspot.com/2006/10/como-fazer-analise-documental.html>, em 28/05/08.

modelos. Vencida esta etapa, o passo seguinte foi explicar o que eram cada um dos aparatos, seus funcionamentos e quais seus objetivos nos experimentos; para isso, nos apoiamos na experiência de um pesquisador de física experimental da área de física atômica, óptica e laser⁴⁰. Tivemos diversos encontros onde fizemos leituras dos artigos, discutimos acerca do funcionamento dos aparatos e quais seus papéis principais nos experimentos, além de exposições de alguns destes aparatos disponíveis no LAPO (Laboratório de Propriedades Ópticas – UFBA), como fototubos, lâmpadas de arco, etc. Em cada encontro buscávamos uma nova abordagem, i.e, leituras que buscavam maior entendimento dos artigos, explicações dos aparatos trazidas pelos autores dos artigos, novidades trazidas em relação aos artigos anteriores, modificações nos experimentos, ampliação dos testes. Fizemos também um estudo histórico de alguns dos aparatos cruciais para a realização dos experimentos, incluindo um estudo das técnicas de excitação, detecção e contagem apresentadas nos experimentos.

Por sugestão do meu orientador (Olival Freire Jr.) realizei um estágio no LAPO (Laboratório de Propriedades Ópticas), sob orientação do meu co-orientador (Denis David), no período de 03/02/2009 a 19/02/2009. Inicialmente o Profº Denis me apresentou o espaço físico do laboratório e os instrumentos que iríamos trabalhar – polarizadores, filtros, fototubos, lentes, fotodiodos, sensores de “PbS” (sulfeto de chumbo), de germânio etc – discutindo seus funcionamentos e aplicações. Discutimos também as montagens experimentais planejadas pelo Profº Denis e seus objetivos. Primeiramente montamos um experimento capaz de verificar o bom funcionamento de filtros e polarizadores. Para isto, um feixe de luz branca passava por uma rede de difração, a qual fazia a decomposição do feixe. A rede de difração girava com auxílio de um motor de passo, o que nos permitiu mapear todo o espectro da luz visível, utilizando um computador. Colocávamos então um filtro ou um polarizador em frente à entrada de luz do detector e verificávamos se a parte que faltava no gráfico estava de acordo

⁴⁰ Profº Dr. Denis David, co-orientador desta dissertação.

com a faixa indicada no polarizador ou no filtro. Repetimos o mesmo procedimento para vários outros filtros e polarizadores. O LAPO tinha apenas suporte (utilizado para prender os filtros na altura do eixo óptico) para filtros de interferência, logo tive que construir um suporte para polarizadores, utilizando tubos e conexões de plástico do tipo PVC e placas de alumínio. Por fim, montamos um experimento que diferenciava os ruídos de fundo (também chamados taxas escuras, os quais explicaremos no tópico 2.1 desta dissertação) dos fototubos das emissões de uma pequena lâmpada (led). Como não tinha nenhum “led” pronto, tive que montar um pequeno circuito composto por um resistor e um diodo, este ligado em paralelo e aquele em serie com o “led”. Colocamos então o led na janela de entrada de luz do fototubo e o isolamos com um tubo de PVC de 100mm de diâmetro, tampado nas extremidades, e um pano preto ao redor deste tubo. No osciloscópio, íamos detectando os picos relativos às emissões do led e os ruídos de fundo do fototubo. Para mim, este estágio foi muito frutífero, pois desenvolvi habilidades relacionadas ao manuseio de instrumentos e montagens experimentais, enfrentando as dificuldades relacionadas à realização de experimentos, além de me trazer maior familiaridade com alguns instrumentos que serão analisados aqui nesta dissertação (fototubos, polarizadores e filtros).

1.3 Referencial Teórico.

A História passou por uma profunda renovação, nos anos 1930, quando Marc Bloch, Lucien Febvre, e outros, redefiniram o que eram seus objetos legítimos ou quando propuseram submeter a seu domínio uma gama de atividades até então mantidas fora de sua jurisdição ou até quando anexavam outras práticas disciplinares, abrindo um novo espaço a conquistar. Indo mais a fundo, eles aboliam uma forma historiográfica particular à disciplina em seu conjunto, a supremacia de um gênero único dominante e tornaram legítimas abordagens até então menores (Pestre 1996, pp. 4-5).

A História das Ciências também sofreu uma renovação análoga à da História, renovação esta que teve início em meados do ano de 1980, visando redefinir a natureza das práticas científicas. O conjunto de proposições a respeito do que são essas práticas constitui um quadro de referência novo para vários historiadores (Pestre 1996, pp. 4-5). Esse novo quadro traz, também, novas formas de abordagem para a ciência. O que propomos fazer aqui nesta dissertação é uma análise histórica dos instrumentos, a qual está bastante relacionada com a história dos instrumentos, que constitui uma dessas novas formas de abordagens para a ciência.

Atualmente a história dos instrumentos está bem estabelecida na história das ciências, seja pela “Scientific Instruments Commission” (organização filiada a “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.), seja por trabalhos como os de Peter Galison, mais precisamente aqueles relacionados à idéia de cultura material. Explicaremos agora o que é cultura material depois retomaremos sua relação com os trabalhos de Galison.

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 o que necessita⁴¹, em outras palavras, o conjunto de objetos – tecidos, utensílios, ferramentas, adornos, meios de transporte, moradias, armas e etc – que formam o ambiente concreto de determinada sociedade⁴². Anteriormente, o conceito de cultura material se aplicava apenas a objetos soltos, que se distinguiam das estruturas fixas por sua mobilidade, contudo, atualmente esse conceito é estendido, de maneira a abranger quase todas as produções humanas.

A idéia de cultura material originou-se da arqueologia. De certa forma, aquela está ligada a esta, pois se “a cultura material se exprime em e por

⁴¹ In Nogueira, 2000, pp. 192.

⁴² http://pt.wikipedia.org/wiki/Cultura_material (Wikipédia, em março de 2007).

objetos, a arqueologia tem a ver com ela” (Pesez 2005, pp275). A “certidão de nascimento” da cultura material foi assinada em 1919 por Lênin – em plena guerra civil – num decreto que instituiu a Academia de História da Cultura Material da URSS (Pesez 2005, pp237). Por outro lado, a cultura material foi introduzida na História das Ciências por Peter Galison, no seu livro *“Image and Logic”* (1997). Nele, Galison confronta duas culturas de construção dos instrumentos utilizados na física das partículas subatômicas ao longo do século XX – a cultura da imagem e a da lógica. A primeira tinha como objetivo representar os processos naturais em sua totalidade e complexidade, através da produção de imagens tão claras que uma única fotografia pode ser uma evidência de um novo efeito ou entidade. Essas imagens são apresentadas e defendidas como miméticas – preserva a imagem das coisas como ocorrem no mundo. Dominique Pestre, ao se referir aos trabalhos de Galison, bem como aos de Assmus e Hackmann, afirma que “o que eles fazem reviver é a importância da tradição mimética da pesquisa, uma tradição que busca imitar a Natureza, uma tradição que visa reproduzir em laboratório os fenômenos naturais” (Pestre 1996, pp25). A outra tradição foi representada por contadores acoplados a circuitos lógicos eletrônicos. Esses contadores construíam argumentos estatísticos, através de coletas de dados, com o objetivo de confirmar a existência de partículas ou efeitos. Esta tradição está mais diretamente associada aos experimentos aqui estudados, já que nestes aparecem contadores de coincidência acoplados a circuitos lógicos eletrônicos. Assim, Galison descortina uma nova forma de abordagem da história das ciências, onde a história não está apenas baseada em acontecimentos intelectuais, mas também na materialidade do mundo.

Galison externa seu fascínio pelo estudo da cultura material no livro *“A ciência tal qual se faz”* no capítulo escrito por ele intitulado “Culturas etéreas e cultura material” (Galison, 1999, pp395):

“...eu achava apaixonantes os trabalhos feitos em história social, trabalhos esses que insistiam na materialidade do mundo...”

Em relação a sua forma de trabalho, ao começar a usar a cultura material como instrumento de estudo, ele explica que:

“...Em vez de periodicizar a história da Física (...) comecei a trabalhar em termos de uma imagem tripartida, na qual a instrumentação, experiência e a teorização caminham cada uma delas ao seu próprio ritmo...” (Galison, 1999, pp397).

Assim Galison nos mostra mais uma vantagem de se utilizar a cultura material no estudo da História das Ciências, já que valoriza o ritmo de desenvolvimento de cada uma dessas sub-culturas (instrumentação, experiência e teorização). Indo mais a fundo, Pestre acredita que “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, pp 21-2).

Galison cita ainda, neste mesmo livro (Galison 1999, pp395), Fernand Braudel, Marc Bloch e E. P. Thompson, afirmando que os trabalhos desses autores o tocou profundamente, externando assim que estes certamente foram fontes de inspiração para ele.

Podemos notar então que uma pesquisa baseada numa análise de instrumentos nos proporciona uma forma de abordagem da história das ciências na qual a materialidade também é valorizada. Pestre acredita que “uma abordagem instrumental tem uma lógica que pode impulsionar todo um campo de pesquisa e induzir reorganizações intelectuais tão rápidas quanto inesperadas”⁴³. Quanto aos instrumentos, podemos afirmar que “só os objetos transcendem a fronteira do tempo e do espaço (...). Uma materialidade é caracterizada pela permanência, mas não pela imobilidade. Aos objetos é conhecida a sua faceta viajante. (...) Por isso, aos objetos é reconhecida a sua imortalidade” (Nogueira 2000).

⁴³ Pestre, 1996, pp. 20-1, op. cit.

2. OS EXPERIMENTOS, SUAS TÉCNICAS, SEUS AUTORES E SEUS RESULTADOS.

Nosso foco principal neste capítulo é o estudo das técnicas de excitação, detecção e contagem, utilizadas em cada um desses experimentos. O estudo destas técnicas, na dissertação aqui apresentada, se faz necessário pelo fato de existir detalhes destas técnicas que precisam ser comentados e que não estão diretamente ligados a nenhum dos aparatos, como, por exemplo, a região de interação da amostra atômica a ser excitada, como essa excitação foi feita, etc. Este estudo é pertinente, pelo fato de podermos dividir os experimentos aqui analisados nessas três técnicas, o que nos faz enxergá-los com outra óptica. Faremos agora uma apresentação mais específica dos experimentos em geral, deixando para comentar acerca de suas técnicas, seus autores e resultados nos tópicos seguintes relacionados a cada experimento.

John Heilbron afirma que uma importante função dos instrumentos da ciência contemporânea é investigar a natureza do mundo⁴⁴. Os experimentos aqui estudados buscam descortinar a natureza do mundo microscópico através da investigação do comportamento de dois fótons correlacionados emitidos de certo decaimento em cascata num átomo de cálcio ou mercúrio. Esta investigação é feita através de um teste experimental das desigualdades de Bell, no qual se verificam as previsões da MQ e das TVOL comparando-as com os resultados experimentais encontrados, e assim indicando-se qual destas teorias está de acordo com a experimentação. Para isso, mede-se a correlação de polarização linear (grandeza que indica se um fóton está correlacionado em polarização com o outro) de dois fótons emitidos em uma cascata do cálcio ou mercúrio. Os fótons emitidos, após passar por filtros, lentes e polarizadores, eram detectados por fototubos, os quais transformavam estes fótons em pulsos elétricos. O circuito de coincidência verificava se os pulsos realmente estavam relacionados com o par de fótons pertencentes ao mesmo decaimento em cascata. Após esta verificação, a

⁴⁴ Heilbron J. L. "The Oxford Companion to the History of Modern Science". Oxford University Press. 2003, (pp. 406).

contagem era efetuada. Os dados obtidos eram aplicados nas equações encontradas nos artigos que descrevem os experimentos e, por fim, os resultados das equações eram comparados com as previsões das TQ e TVOL.

Outros experimentos envolvendo medidas de fótons correlacionados foram realizados. Por exemplo, Wu e Shakhnov realizaram um experimento com espalhamento de radiação, em 1950, empregando aniquilação de um par elétron-pósitron, que media a correlação de polarização de raios gama (γ)⁴⁵. Para isto, eles utilizaram uma fonte de cobre, tubos fotomultiplicadores do tipo RCA 5819 e contadores de cintilação⁴⁶. Clauser, Horne, Shimony e Holt⁴⁷ investigaram a possibilidade de usar o arranjo experimental de Wu e Shakhnov, talvez com alguma variação, em um novo teste das desigualdades de Bell, contudo não existiam analisadores com uma eficiência suficientemente alta para realizar o referido teste, logo os autores concluíram que isto não seria possível⁴⁸. Outros exemplos são os experimentos⁴⁹ em que o par de fótons era produzido por aniquilação de pósitrons, nos quais, devido a baixa eficiência dos polarizadores para fótons de 0,5MeV, várias considerações foram feitas para se interpretar o resultado via teorema de Bell (apud Aspect, Grangier e Roger, 1981, pp. 460).

Como já afirmamos anteriormente, podemos dividir os experimentos aqui estudados em três técnicas: de excitação, de detecção e de contagem. A primeira é caracterizada pela produção de átomos excitados e emissão dos fótons correlacionados, representada pelos aparatos que compõem todo o processo de excitação – fornos, lâmpadas de arco, lasers sintonizáveis, canhão de elétrons, etc. Esta técnica não só envolve a excitação em si, mas também as condições propícias para que a estatística produza um valor com

⁴⁵ Clauser and Shimony, 1978, pp. 1914.

⁴⁶ Wu, C. S. and Shakhnov I. “*The Angular Correlation of Scattered Annihilation Radiation*” *Phy. Rev. Let.* V. 77, N°1, 1950, pp. 136.

⁴⁷ In: CHSH, 1969. Apud Clauser and Shimony, 1978.

⁴⁸ Clauser and Shimony, 1978.

⁴⁹ L. R. Kasday, J. D. Ullman, and C. S. Wu, *Nuovo Cimento* **B25**, 633 (1975); M. Bruno, M. d’Agostino, and C. Maroni, *Nuovo Cimento* **B40**, 142, (1977); K. Mesenheimer, thesis, University of Freiburg, 1979 (unpublished); G. Faraci D. Glutkowski, S. Nottarigo, and A. R. Pennisi, *Lett. Nuovo Cimento* **9**, 607 (1974); A. R. Wilson, J. Lowe, and D. K. Butt, *J. Phys. G* **2**, 613 (1976). Apud Aspect, Grangier and Roger, 1981, Ref. 8 e 9.

precisão suficiente para validar uma das duas teorias (TQ ou TVOL): como seleção do isótopo de cálcio ou mercúrio, excitação seletiva do devido estado para emissão da cascata, controle da pressão do vapor para evitar a armadilha do feixe de radiação (laser beam trap), etc. A segunda técnica é caracterizada pela seleção, detecção e transformação dos fótons em pulsos elétricos. Os principais instrumentos que compõe esta técnica são lentes, filtros, polarizadores e fototubos. A seleção desses fótons é um trabalho bastante crítico: abertura da óptica para coletar o máximo de fótons vindo da zona de interação, seleção dos devidos fótons da cascata, seleção da polarização dos fótons, redução dos ruídos nos fototubos, etc. A terceira técnica utilizada nos experimentos é a da contagem de coincidências, aqui representada pelo circuito de coincidência e todos os aparatos necessários para que a contagem seja realizada. Podemos afirmar que esta técnica está diretamente ligada à técnica de detecção, pois após serem detectados os fótons são transformados em pulsos elétricos pelos fototubos, para que possa ser verificada a coincidência pelo circuito de coincidência e posteriormente serem contados. Comentaremos agora sobre as particularidades de cada uma dessas técnicas (excitação, detecção e contagem) nos seus respectivos experimentos, bem como suas principais diferenças e o desenvolvimento de cada uma delas de um experimento para outro, caso haja.

2.1 O experimento realizado por Freedman e Clauser (1972).

O primeiro dos experimentos analisados aqui nesta dissertação, intitulado “*Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories*”, foi realizado na *University of Berkeley*, Califórnia, publicado em 1972, por Stuart Jay Freedman e John Francis Clauser.

O americano John Clauser nasceu em 1942, se graduou na Universidade de Berkeley e obteve o grau de Doutor na Universidade de Columbia. Sua tese foi sobre medida de radiação cósmica de fundo, sob

orientação de Patrick Thaddeus. Durante seu doutorado, o treinamento que Clauser teve na área de física experimental (medida da radiação cósmica de fundo) o deixou hábil a desenvolver o experimento agora analisado. Clauser começou a se interessar pelo teorema de Bell quando estava finalizando seu doutorado⁵⁰. Freedman concluiu seu doutorado em 1972, na universidade de Berkeley, o qual foi justamente relativo ao experimento em questão. Atualmente Freedman é professor da Universidade de Berkeley, associado na “*American Physical Society*”, membro na “*National Academy*” e ocupa a cadeira Luis W. Alvarez de física experimental, em Berkeley⁵¹. Uma das dificuldades enfrentada por Freedman e Clauser foi não conhecer qual deveria ser o resultado experimental a se encontrar, pois como afirmou o próprio Freedman (in Gilder 2008, pp. 285) é uma grande ajuda quando se conhece qual deve ser o resultado experimental que se procura, quando não se sabe realmente se aquele é o resultado correto pensa-se que seu experimento tem algum problema. De fato é bem mais fácil quando se sabe qual resultado deve encontrar e realiza-se um experimento para confirmar a teoria. Vale ressaltar que Freedman e Clauser passaram dois anos construindo e testando os aparatos para realizar um experimento cuja realização durou um período de dois meses⁵². Além disso, os autores foram os primeiros a realizar este tipo de experimento com fótons ópticos, e como disse o próprio Clauser, “na idade da pedra do hardware”⁵³, não tendo nenhum referencial ou resultado experimental anterior que pudesse norteá-los⁵⁴.

⁵⁰ In Freire 2006, pp. 589-600.

⁵¹ Fisicos de Berkeley, physics@berkeley, acessado em 08/07/2008, in: http://physics.berkeley.edu/index.php?option=com_dept_management&act=people&Itemid=312&task=view&id=169

⁵² Gilder 2008, pp. 267.

⁵³ In Gilder 2008, pp. 267.

⁵⁴ Para um perfil mais detalhado de Clauser e Freedman ver Freire 2006, pp. 589-90.

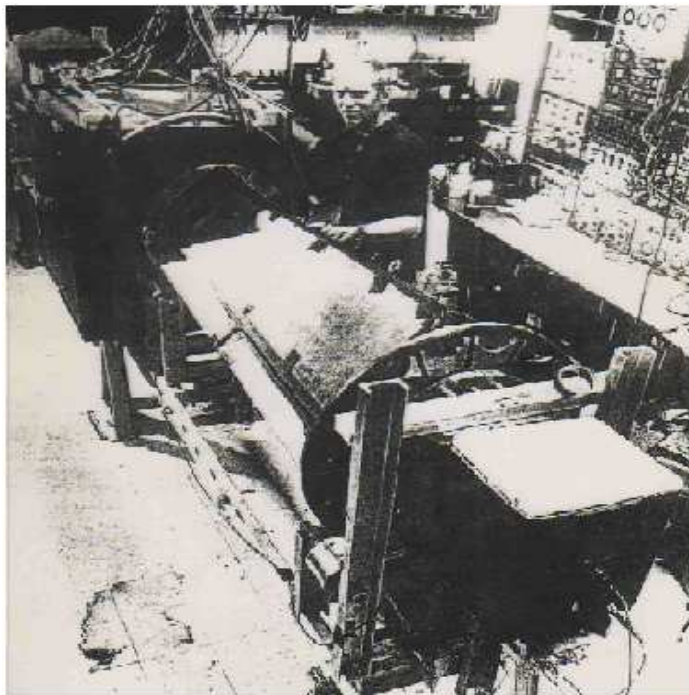


Fig 2: John F. Clauser junto com seu aparato experimental, 1970.



Fig 3: Stuart Jay Freedman. In:

http://physics.berkeley.edu/index.php?option=com_dept_management&act=people&Itemid=312&task=view&id=169 (USA) em 08/07/2008. (Freedman).

Na técnica de excitação eles usaram um decaimento em cascata num átomo de cálcio para medir a correlação de polarização linear do par de fótons oriundos desta cascata. Um feixe de cálcio foi emitido, na forma de vapor, de um forno de tântalo (ou tantálio). Este feixe foi então excitado através do processo de absorção de ressonância, no qual uma lâmpada de arco de deutério emitia um feixe contínuo de luz ultravioleta com comprimento de onda de 227,5 nm. Antes de excitar o átomo de cálcio, a luz da lâmpada de deutério passava por uma lente, para colimar o feixe, e por

um filtro de interferência, que selecionava os fótons com comprimento de onda adequado para excitar o átomo. A região de interação era o local onde o cálcio interagia com a luz, ocorrendo assim a excitação. Consistia de um cilindro de vidro (Pyrex) 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 $4s_2^1S_0$ para o nível excitado $3d4p^1P_1$. Dos átomos que não decaíam diretamente para o estado fundamental, apenas 7% decaíam 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 momentum angular total). Esta técnica fez com que o experimento durasse 200h para ser totalmente realizado, isto porque ocorriam vários decaimentos além do que originava o par de fótons correlacionados. Com isso a quantidade de dados coletados foi relativamente baixa, comparada com a quantidade de fótons emitidos. Como estes eram experimentos estatísticos, a quantidade de dados era fator fundamental. Abaixo temos o esquema de decaimento em cascata apresentado por Freedman and Clauser:

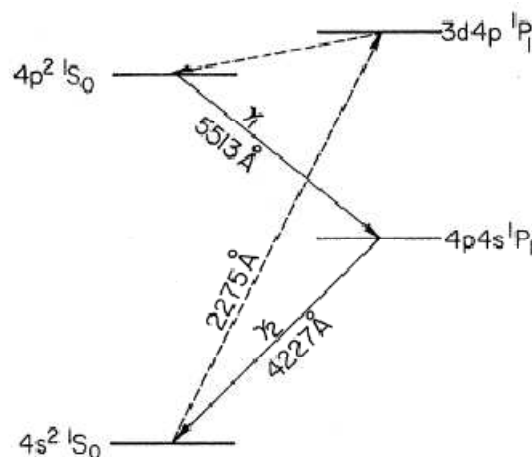


Fig 4: Esquema do decaimento em cascata para o átomo de cálcio. A linha pontilhada mostra a trajetória de excitação partindo do estado inicial. In: Freedman and Clauser 1976, pp940.

Bem como na técnica de excitação, a técnica de detecção não se caracteriza apenas pela detecção em si, mas também pelas condições ideais para que ela ocorra. Essas condições estão relacionadas à seleção dos

fótons com o devido comprimento de onda e devida polarização, manter o ambiente com baixa luminosidade e baixa intensidade do campo magnético o suficiente para que não influenciem no experimento, etc. Antes de serem detectados, era necessário selecionar os fótons que realmente pertenciam à cascata desejada, já que eram emitidos outros fótons além destes. Para isto, primeiramente os fótons emitidos passavam por lentes, que tinham como objetivo reduzir o fenômeno da aberração esférica (no lugar de um ponto ver-se uma mancha), fenômeno este que poderia reduzir a eficiência da contagem. Como as emissões ocorriam em diversas direções, para se obter eficiência máxima era necessário aproveitar a maior quantidade de fótons possíveis, já que estes são experimentos estatísticos, conforme já foi afirmado anteriormente. Para isto foram usadas lentes colimadoras com certo ângulo de aceitação, reduzindo assim a possibilidade de um dos detectores contar um fóton pertencente ao par correlacionado e o outro detector não contar o outro fóton pertencente ao referido par, perdendo assim a medida. Outra necessidade era de se escolher os fótons que realmente pertenciam ao par correlacionado, evitando que fossem contados fótons que não pertenciam ao referido par. A primeira seleção era feita com os filtros de interferência, onde só passavam os fótons com os devidos comprimentos de ondas. Outra seleção era feita pelos polarizadores, onde os fótons com a devida polarização passavam pelos polarizadores chegando nos fototubos, caso isso não ocorresse, os fótons não passavam. Como a maior violação das desigualdades de Bell ocorre nos ângulos " φ " (ângulo entre o plano de polarização e a orientação definida nos 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. Estes detectavam os fótons através do efeito fotoelétrico, onde a luz incidente era absorvida e elétrons eram emitidos. Estes elétrons se chocavam com dinodos e em cada um destes choques um elétron deslocava de três a quatro novos elétrons, que eram acelerados até o próximo dinodo, repetindo este processo sucessivamente, transformando a luz em pulsos elétricos. Esses pulsos seriam selecionados como evento válido pelo circuito de coincidência. Esses fototubos foram resfriados com o intuito de reduzir os

ruídos de fundo (são emissões espontâneas de elétrons do cátodo que ocorrem devido à temperatura dos fototubos, mesmo estes estando num ambiente totalmente escuro ocorrem detecções devido a estas emissões), as quais influenciariam nos resultados experimentais, já que este é um experimento estatístico.

Na técnica de contagem de coincidência, 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. Foram utilizados dois canais de coincidências, o primeiro canal fazia a contagem de todas as coincidências e o segundo fazia a contagem das coincidências acidentais. Esta contagem de coincidências acidentais era realizada através de um atraso de 50 ns em um dos lados deste segundo canal de coincidência. As coincidências totais eram subtraídas pelas coincidências acidentais, obtendo-se assim as coincidências reais. Um conversor tempo-amplitude estava ligado a um analisador de altura de pulso, os quais mediam o tempo de atraso do espectro de dois fótons, sendo que o resultado trouxe o tempo de vida do estado intermediário (~ 5 ns). Isto era importante para se obter a janela de coincidência adequada para este experimento. Janela de coincidência é o tempo mínimo entre as detecções dos dois fótons para que estes sejam considerados pertencentes ao par correlacionado e era encontrada a partir do tempo de vida do estado intermediário. O conversor tempo amplitude e o analisador de altura de pulso (comentaremos mais sobre estes aparatos no tópico 3.1) mediram o espectro do atraso de tempo dos dois fótons, o que permitiu obter o tempo de vida do estado intermediário⁵⁵. O curto tempo de vida do estado intermediário permitiu uma estreita janela de coincidência de 8,1 ns. O tempo de resolução total do sistema foi de 1,5 ns. A taxa de coincidência (razão entre as coincidências totais e as coincidências acidentais) dependia do feixe e da intensidade da lâmpada, o qual foi decrescendo gradualmente durante o experimento.

⁵⁵ Freedman and Clauser 1972, pp. 940. Para um maior aprofundamento ver Freedman and Clauser 1972, ref 11, pp. 941.

A desigualdade apresentada por Freedman e Clauser, no artigo que descreve o experimento em questão foi a seguinte⁵⁶:

$$-1 \leq \Delta(\varphi) \leq 0$$

Vale ressaltar que a desigualdade acima deve ser satisfeita por qualquer TVOL e foi derivada da desigualdade de Bell, onde φ é o ângulo entre o plano de polarização e a orientação definida nos polarizadores e $\Delta(\varphi)$ é dado pela equação abaixo⁵⁷:

$$\Delta(\varphi) = \frac{3R(\varphi)}{R_0} - \frac{R(3\varphi)}{R_0} - \frac{R_1 + R_2}{R_0}$$

Onde:

$R(\varphi)$ = taxa de coincidência para detecção dos dois fótons;

R_1 = taxa de coincidência com o polarizador dois retirado;

R_2 = taxa de coincidência com o polarizador um retirado;

R_0 = taxa de coincidência com ambos os polarizadores retirados.

Para uma detecção de ângulos sólidos suficientemente pequenos e polarizadores com eficiência suficientemente alta, esta desigualdade é violada pela previsão da mecânica quântica, para uma certa faixa de valores de φ . A máxima violação ocorre nos valores de $\varphi=22,5^\circ$ e $\varphi=67,5^\circ$, para os quais os autores utilizaram uma expressão mais simples para $\Delta(\varphi)$, a qual não envolve R_1 ou R_2 , a saber⁵⁸:

$$\Delta(\varphi) = \delta = \left| \frac{R(22,5^\circ)}{R_0} - \frac{R(67,5^\circ)}{R_0} \right| - \frac{1}{4} \leq 0.$$

⁵⁶ Equação retirada do artigo publicado por Freedman and Clauser 1972, pp. 939.

⁵⁷ Op. cit. nota 43. In: Freedman and Clauser 1972, pp. 939.

⁵⁸ Op. cit. nota 43. In: Freedman and Clauser 1972, pp. 939.

A equação acima foi utilizada por Freedman e Clauser para o cálculo da taxa de coincidência dos fótons, bem como por Clauser (1976), Fry e Thompson (1976) e Aspect, Grangier e Roger (1982). Com os dados obtidos nos experimentos, eles substituíam os valores na referida equação e encontravam os resultados experimentais. Esses resultados eram comparados com as previsões teóricas da MQ e das TVOL, expressas pela desigualdade anteriormente apontada.

A previsão da MQ para a relação entre as taxas de coincidência é dada pela equação⁵⁹:

$$\frac{R(\varphi)}{R_0} = \frac{1}{4}(\varepsilon_M^1 + \varepsilon_m^1)(\varepsilon_M^2 + \varepsilon_m^2) + \frac{1}{4}(\varepsilon_M^1 - \varepsilon_m^1)(\varepsilon_M^2 - \varepsilon_m^2)F_1(\theta)\cos 2\varphi$$

$$\text{onde, } \frac{R(1)}{R_0} = \frac{1}{2}(\varepsilon_M^1 + \varepsilon_m^1) \text{ e } \frac{R(2)}{R_0} = \frac{1}{2}(\varepsilon_M^2 + \varepsilon_m^2).$$

ε_M^1 e ε_m^2 são as transmitâncias dos polarizadores 1 e 2 para as luzes paralelas e ε_m^1 e ε_M^2 são as transmitâncias dos polarizadores 1 e 2 para as luzes perpendiculares. A previsão da MQ, tomando os ângulos de maior violação das desigualdades (22,5° e 67,5°), para a relação entre as taxas de coincidência é⁶⁰:

$$\left| \frac{R(22,5^\circ)}{R_0} - \frac{R(67,5^\circ)}{R_0} \right| = 0,301 \pm 0,007$$

Sendo $\Delta(\varphi) = \delta = \left| \frac{R(22,5^\circ)}{R_0} - \frac{R(67,5^\circ)}{R_0} \right| - \frac{1}{4} \leq 0$, valor de previsto pela MQ, para o experimento em questão, será $\delta = 0,051 \pm 0,007$.

O valor experimental encontrado por Freedman e Clauser para os ângulos de 27,5° e 67,5° foi de $\delta = 0,050 \pm 0,008$, em clara discordância com a desigualdade $-1 \leq \Delta(\varphi) \leq 0$. Os autores comparam o resultado

⁵⁹ Op. cit. nota 41. In: Freedman and Clauser 1972, pp. 939.

⁶⁰ Equação retirada do artigo Clauser and Shimony, 1978, pp. 1909.

experimental encontrado com o resultado previsto pela MQ através do seguinte gráfico:

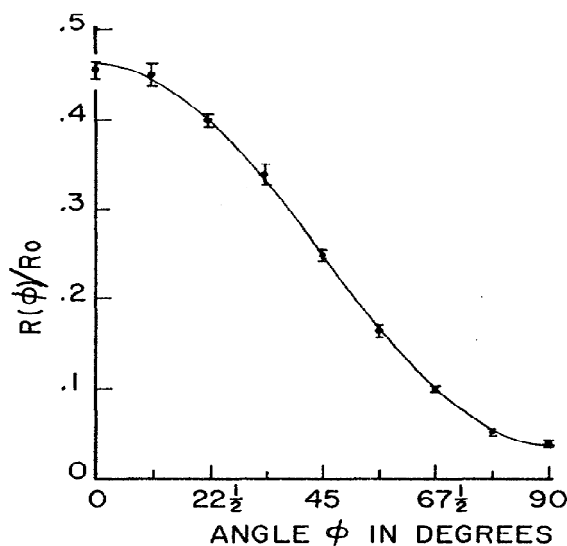


Fig 5: Gráfico da taxa de coincidência com o ângulo Φ entre os polarizadores dividida pela taxa de coincidência com ambos polarizadores removidos versus o ângulo Φ . A curva contínua é a previsão da MQ, calculada usando as eficiências medidas nos polarizadores e os ângulos sólidos no experimento, e os pontos são os resultados das medidas encontradas. Figura retirada do artigo Freedman and Clauser 1972.

O resultado deste experimento, ao contrário do que achava o próprio Clauser – que acreditava que balançaria o mundo com um resultado que confirmasse a existência das variáveis ocultas⁶¹ – favoreceu a MQ. Apesar da baixa eficiência do experimento (em relação aos fótons emitidos e os utilizados na acumulação de dados) os autores consideram seus resultados confiáveis.

2.2 O experimento realizado por Clauser (1976).

A tese de doutoramento de Richard Holt, sob orientação de Francis Marion Pipkin, em 1973 na Universidade de Harvard, foi sobre um experimento com este mesmo objetivo, testar as desigualdades de Bell.

⁶¹ in Freire, 2006, pp. 590.

Contudo, o resultado experimental encontrado favoreceu as TVOL, ao contrário do experimento anterior realizado anteriormente por Freedman e Clauser, sendo $\delta = 0,216 \pm 0,013$ ⁶², de acordo com a desigualdade

$$\delta = \left| \frac{R(22,5^\circ)}{R_0} - \frac{R(67,5^\circ)}{R_0} \right| \leq \frac{1}{4}, \text{ anteriormente comentada no t\u00f3pico 2.1, e}$$

contr\u00e1rio a previs\u00e3o da MQ $\delta = 0,266$ ⁶³. Por\u00e9m Holt e Pipkin, por algum motivo, n\u00e3o publicaram seus resultados, tendo os mesmos circulados na forma de “preprint”, e sendo bastante criticados. Este experimento n\u00e3o foi aqui analisado pelo fato de n\u00e3o ter sido publicado (j\u00e1 que optamos pela an\u00e1lise dos aparatos relacionados nos artigos que descrevem os experimentos), al\u00e9m de ter sido fortemente criticado pela comunidade cient\u00edfica. A conjectura de Clauser e Shimony⁶⁴ \u00e9 que o bulbo de vidro “Pyrex” que envolvia o mecanismo de excita\u00e7\u00e3o era opticamente ativo, o que levou a erros sistem\u00e1ticos que n\u00e3o foram adequadamente compensados⁶⁵. Osvaldo Pessoa tamb\u00e9m afirma que provavelmente foi devido a problemas nos aparatos⁶⁶.

Clauser ent\u00e3o refez esse experimento (o realizado por Holt e Pipkin), na *University of California, Berkeley*. Seus resultados foram publicados na *Phy. Rev. Let.* 36(21), em 1976, num artigo intitulado “*Experimental Investigation of a Polarization Correlation Anomaly*”. Ele manteve alguns t\u00f3picos e fez modifica\u00e7\u00f5es em outros, como, por exemplo: os polarizadores usados por Holt e Pipkin foram do tipo prismas de calcita, os utilizados por Clauser foram pilhas de placas de vidro, os mesmos utilizados no experimento anterior que ele havia realizado com Freedman, por\u00e9m agora o n\u00famero de placas polarizadoras foi aumentado para quinze, ao inv\u00e9s de dez; Clauser tamb\u00e9m usou os filtros do experimento anterior, s\u00f3 que agora, um filtro para cada polarizador (antes era um filtro colocado na frente dos

⁶² In: Clauser and Shimony 1978, pp. 1909.

⁶³ In: Clauser and Shimony 1978, pp. 1909.

⁶⁴ In: Clauser and Shimony 1978, pp. 1910.

⁶⁵ In: Freire 2006, pp. 598.

⁶⁶ In: Pessoa 2005, pp. 287.

polarizadores); Holt e Pipkin usaram Hg^{198} , no decaimento em cascata, Clauser usou Hg^{202} .

A técnica de excitação foi realizada através de bombardeamento de elétrons, onde o choque destes elétrons com o átomo de Hg excitou a amostra, ocorrendo assim um decaimento em cascata ($J=1 \rightarrow J=1 \rightarrow J=0$). Dois diafragmas de 2 mm de diâmetro colimavam o feixe de elétrons na região da fonte, buscando aproveitar o máximo de elétrons possíveis para o processo de excitação, já que esses são experimentos em estatística a quantidade de dados acumulados é fator determinante. A região de interação era um cilindro de 2 mm, formado pelo feixe de elétrons colimados. Toda a fonte estava encerrada num bulbo de pirex contendo 91% de Hg^{202} , 2,1% de Hg^{199} e 2,2% de Hg^{201} . Um feixe de elétrons de 135 eV foi focalizado no bulbo por furos colimadores de 2 mm de diâmetro, ocorrendo a excitação, em seguida o decaimento, e conseqüentemente a emissão dos fótons correlacionados. Esses fótons, correlacionados por polarização, eram emitidos da cascata $9^1P_1 \rightarrow 7^3S_1 \rightarrow 6^3P_0$, com comprimentos de onda iguais a $\lambda_1 = 5676 \text{ \AA}$ e $\lambda_2 = 4046 \text{ \AA}$. Com o objetivo de manter uma corrente em $125 \text{ nA} \pm 1\%$ 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 50 mG), evitando a influência do campo magnético terrestre, o que alteraria os dados experimentais, isto por que os níveis energia 1P_1 e 3S_1 podem se separar na presença de um campo magnético, o que poderia alterar a correlação de polarização. O tempo de realização do experimento foi de 412 h. Como Clauser não apresentou um esquema de decaimento em cascata no artigo que descreve o experimento em questão, optamos por não ilustrar este decaimento.

A técnica de detecção utilizada foi similar à do experimento realizado por Freedman e Clauser, apesar de que agora os fótons foram emitidos de uma cascata de Hg. Com isso os filtros e os polarizadores foram diferentes,

bem como os detectores (fototubos) foram de outro modelo. Contudo não ocorreram mudanças significativas nesta técnica.

A técnica de contagem de coincidência foi à mesma utilizada no experimento anterior (realizado por Freedman e ele), sendo a janela de coincidência diferente (12,93 ns)⁶⁷. Por conseguinte, a equação utilizada no cálculo da taxa de coincidência também foi à mesma.

O valor experimental encontrado por Clauser foi $\delta = 0,038 \pm 0,0093$, em claro desacordo com a desigualdade $-1 \leq \Delta(\varphi) \leq 0$ e em concordância com o valor teórico previsto pela MQ $\delta = 0,0348$. O resultado deste experimento favoreceu a MQ, criando mais uma forte evidência contra todo o rol de TVOL.

2.3 O experimento realizado por Fry e Thompson (1976).

Edward S. Fry juntamente com seu estudante de pós-graduação (doutorado), Randall Thompson, em 1976, realizaram outro experimento com objetivo de testar as desigualdades de Bell. Enquanto fazia sua tese de doutorado, em Michigan, Fry trabalhou com física atômica e espectroscopia⁶⁸. Em 1969 foi nomeado professor da “Texas A & M University” e ocupa esse cargo até a presente data⁶⁹. Em 1976 orientou a tese de Thompson, que foi baseada na realização do experimento em questão⁷⁰.

⁶⁷ Clauser 1976, pp1225.

⁶⁸ In: Freire 2006, pp594.

⁶⁹ In: <http://www.physics.tamu.edu/people/showpeople.php?name=Edward%20Fry&userid=fry>, acessado em 30/07/2008.

⁷⁰ Para um perfil mais detalhado de Fry ver Freire 2006, pp 600-6.



Fig 6: Edward S. Fry in:

<http://www.physics.tamu.edu/people/showpeople.php?name=Edward%20Fry&userid=fry>
USA, em 30/07/2008.

A cascata de mercúrio (Hg^{200}) usada na técnica de excitação foi à seguinte: $7^3S_1 - 6^3P_1 - 6^1S_0$. Apesar dos autores afirmarem que o mecanismo de excitação foi similar ao do experimento realizado por Clauser (1976)⁷¹, introduziu-se uma grande novidade nesta técnica, melhorando muito a acumulação de dados. A saber, o uso de um laser sintonizável no segundo dos dois passos da excitação. No primeiro passo o mercúrio era excitado por bombardeamento de elétrons, onde um feixe de elétrons de 135eV colidia com os átomos de mercúrio. Estes átomos eram excitados para o nível intermediário 6^3P_2 , no qual ocorreria o segundo passo da excitação. O segundo passo era realizado através do fenômeno da absorção por ressonância de um laser sintonizável, que emitia um feixe de luz com comprimento de onda $\lambda=5461\text{\AA}$. O laser sintonizável interceptava o feixe de mercúrio em dois locais diferentes. O primeiro antes da região de interação, para verificar se a fluorescência era máxima, o que garantia uma boa acumulação de dados. O segundo na região de interação, onde ocorria o segundo passo da excitação. Eles também utilizaram uma armadilha de feixe de laser (laser bean trap) para evitar que o feixe que realiza o segundo passo da excitação refletisse. Um terceiro fototubo gerenciava um “servo loop” (laço de realimentação) para estabilizar a corrente elétrica que realizava o primeiro passo da excitação em 125mA, com um desvio de $\pm 1\%$. O mercúrio era excitado para o nível 7^3S_1 , no qual poderiam ocorrer decaimentos para três

⁷¹ Fry & Thompson, 1976, pp465.

níveis diferentes, 6^3P_1 , 6^3P_2 ou 6^3P_0 , dos quais o decaimento para o nível 6^3P_1 , e consequentemente para o nível 6^1S_0 , originava o par de fótons correlacionados. Vale ressaltar que o único decaimento em cascata era o que gerava o par de fótons correlacionados, o que facilitava na coleta de dados, já que não existiam outros estados de decaimento em cascata que possivelmente poderiam ser contados como eventos válidos sem serem. Estes fótons tinham o comprimento de onda de 4358 Å e 2537 Å, dos quais só o primeiro estava na faixa do visível, o segundo na faixa do ultravioleta. Os dois passos da excitação ocorreram em locais físicos diferentes. Conseqüentemente na região de interação (onde o nível 7^3S_1 era povoado) não existia outro estado de decaimento em cascata além do que originava os fótons correlacionados, por isso existia uma correspondência “de um para um” entre os fótons emitidos e os utilizados na excitação. Com isso foi obtido um resultado relativamente alto na cumulação de dados, comparando com os dois experimentos realizados anteriormente, pois se evitava possíveis contagens que não fossem do par de fótons correlacionados, além de ter reduzido o tempo de realização do experimento para 80min, enquanto que no experimento realizado por Freedman e Clauser (1972) foi de aproximadamente 200 h e no realizado por Clauser (1976) 412 h. Abaixo temos o esquema do decaimento em cascata apresentado por Fry e Thompson no artigo que descreve o experimento em questão:

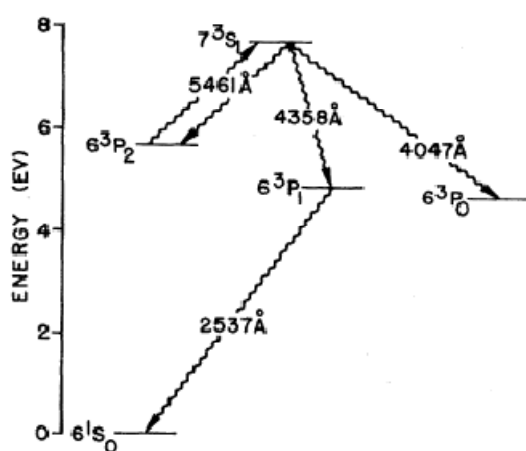


Fig 7: Esquema do decaimento em cascata para o átomo de mercúrio. In: Fry and Thompson 1976, pp 465.

A técnica de detecção foi similar aos experimentos anteriores, utilizando-se os mesmos tipos de polarizadores e detectores. Logicamente os filtros de interferência foram diferentes, já que as frequências dos fótons correlacionados também mudaram. Logo, não há necessidade de comentarmos novamente sobre esta técnica.

Um raciocínio análogo ao aplicado na técnica de detecção pode ser usado na técnica de contagem, já que esta também foi similar a dos experimentos anteriores, bem como as equações utilizadas no cálculo da correlação de polarização.

O resultado experimental encontrado foi de $\delta = 0,0460 \pm 0,0014$, de acordo com o valor teórico previsto pela MQ de $\delta = 0,0440 \pm 0,0007$ e violando a desigualdade $\Delta(\varphi) = \delta = \left| \frac{R(22,5^\circ)}{R_0} - \frac{R(67,5^\circ)}{R_0} \right| - \frac{1}{4} \leq 0$, comentada anteriormente no tópico 2.1, favorecendo a MQ e assim, criando fortes evidências contra as TVOL's.

2.4 O primeiro experimento realizado por Aspect, Grangier e Roger (1981).

O ponto culminante dos testes do teorema de Bell, para os seis experimentos aqui estudados bem como o período durante suas realizações, foi quando o francês Alain Aspect liderou duas equipes diferentes que realizaram três experimentos nesta linha.

O primeiro experimento Aspect realizou juntamente com Philippe Grangier e Gérard Roger, na Universidade Paris-Sud em Orsay, o qual foi publicado na *Physical Review Letters* em Agosto de 1981, intitulado “*Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem*”. Alain Aspect nasceu em 15 de junho de 1947 em Agen, cidade da França, foi aluno da “*École Normale Supérieure de Cachan*” e diretor substituto da

“grande école SupOptique”, sendo seu doutoramento justamente um projeto de um experimento no qual as configurações dos polarizadores pudessem ser mudadas enquanto os fótons estivessem em vôo⁷². Aspect realizou este primeiro experimento com a colaboração de seu estudante de pós-graduação Philippe Grangier e o engenheiro pesquisador Gerard Roger⁷³. Atualmente Aspect é membro da Academia Francesa de Ciências, da Academia Francesa de Tecnologia e professor da “Ecole Polytechnique”⁷⁴. Vale ressaltar que Aspect liderou duas equipes diferentes que realizaram os três próximos experimentos analisados aqui nesta dissertação⁷⁵. Atualmente Philippe Grangier é líder do grupo de óptica quântica “*Groupe d’Optique quantique*” no “*Institute d’Optique*” e diretor de pesquisa do CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique)⁷⁶.



Fig 8: Alain Aspect. in: <http://www2.cnrs.fr/en/394.htm>, França, em 21/09/2008.



Fig 9: Philippe Grangier. in: http://www.iota.u-psud.fr/~grangier/Quantum_optics.html, em 30/08/2008, França.

⁷² In: Freire 2006, pp. 606-7.

⁷³ In: Freire 2006, pp. 608.

⁷⁴ In: <http://www2.cnrs.fr/en/394.htm>, França, acessado em 21/09/2008.

⁷⁵ Para um perfil mais detalhado de Aspect ver Freire 2006, pp. 606-610.

⁷⁶ In: http://www.iota.u-psud.fr/~grangier/Quantum_optics.html, França, acessado em 30/08/2008.

A grande vantagem deste experimento em relação aos discutidos anteriormente está na técnica de excitação. Nesta a auto-eficiência da fonte – produção eficiente de pares de fótons correlacionados, com uma taxa de emissão bastante alta e bem estável – proporcionou uma precisão estatística jamais alcançada anteriormente, em experimentos desta linha. Isto se deu devido ao uso de dois lasers sintonizáveis para realizar a excitação, proporcionando um aumento na taxa de excitação, a qual foi mais de dez vezes maior que no experimento realizado por Fry & Thompson (1976). A região de interação era um cilindro de 1mm de comprimento, com diâmetro de 60 μ m, na qual a densidade dos átomos era baixa o suficiente ($3 \cdot 10^{10}$ átomos/cm³) para evitar a absorção dos fótons correlacionados por átomos vizinhos, já que estes fótons poderiam ser reemitidos, perdendo assim sua correlação de polarização com o outro fóton correlacionado.

Na técnica de excitação os autores usaram a mesma cascata de cálcio utilizada por Freedman e Clauser (1972), na qual são emitidos dois fótons, na faixa do visível no estado de singleto, ou estado emaranhado (no artigo que descreve o referido experimento, pp. 91, os autores usam o termo “estado puro não fatorável”, que tem o mesmo significado de estado de singleto ou estado emaranhado, i.e., não podemos atribuir um estado independente a cada uma das partículas, mas sim às duas conjuntamente)⁷⁷. Conforme dito anteriormente, a excitação foi feita em dois passos, na qual em ambos foram usados lasers. No primeiro passo usaram um laser de Kriptônio, de modo único (ou mono modo, i.e, emite em apenas uma frequência), com comprimento de onda de 406,7nm, para excitar o cálcio do nível $4S_2S_0$ para um nível intermediário “provisório” (não é um estado estacionário do átomo, sendo que desaparece com a ausência do laser). No segundo passo o cálcio foi excitado para nível $4p_2^1S_0$, por um laser de rodamine 6G dye (que é um corante) com comprimento de onda de 581nm. Abaixo, o esquema do decaimento em cascata para o átomo de cálcio utilizado no experimento em

⁷⁷ Para um maior aprofundamento sobre emaranhamento ver: Rigolin, G. G. “*Estados Quânticos emaranhados*”. Tese de doutoramento. Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP, 2005.

questão, vale ressaltar que apesar da técnica ser diferente a cascata é a mesma utilizada por Freedman and Clauser 1972:

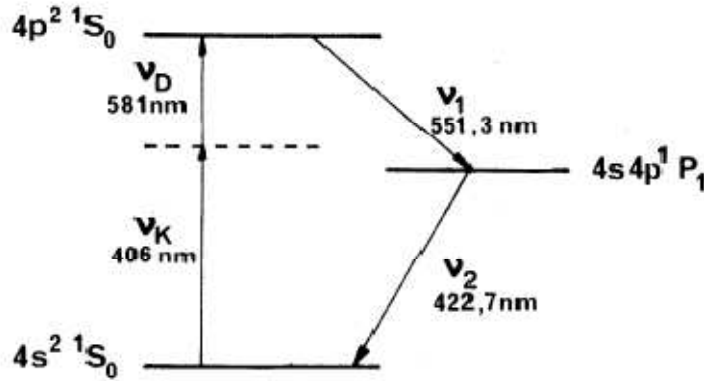


Fig 10: Esquema do decaimento em cascata para o átomo de cálcio. In: Aspect, Grangier and Roger 1981, pp 461.

A técnica de detecção, bem como a de contagem de coincidência, não teve mudanças significativas para esta análise.

Neste experimento, o valor encontrado foi $\delta_{\text{exp}} = 5,72 \times 10^{-2} \pm 0,43 \times 10^{-2}$, de acordo com o valor teórico previsto pela MQ de $\delta_{\text{MQ}} = 5,8 \times 10^{-2} \pm 0,2 \times 10^{-2}$ e

discordando com a desigualdade $\Delta(\varphi) = \delta = \left| \frac{R(22,5^\circ)}{R_0} - \frac{R(67,5^\circ)}{R_0} \right| - \frac{1}{4} \leq 0$

(comentada anteriormente no tópico 2.1), apontando claramente para as previsões da MQ.

2.5 O segundo experimento realizado por Aspect, Grangier e Roger (1982).

O segundo experimento realizado por Aspect, também juntamente com Philippe Grangier e Gérard Roger, foi publicado na Phy. Rev. Let., em 12 de Julho de 1982, o qual foi intitulado “*Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities*”.

A técnica de excitação foi similar à utilizada no experimento anterior (pp. 92), contudo a taxa de emissão de fótons correlacionados teve um aumento. Para o experimento analisado anteriormente, esta taxa foi de 4.10^7 por segundo, no experimento em questão foi de 5.10^7 por segundo. Esta mudança não trouxe muita consequência para o experimento, apesar de implicar numa melhoria da técnica de excitação, já que estes são experimentos estatísticos.

Na técnica de detecção ocorreram mudanças bastante significativas, comparando com os experimentos analisados nesta dissertação. A mais importante delas, para a análise aqui realizada, foi que eles mediram a polarização dos fótons em dois eixos, paralelo e perpendicular à direção do feixe de bombeamento óptico (uma melhor visualização pode ser obtida no tópico 3.5 quando explicamos os tipos de polarizadores utilizados no experimento em questão). Isto proporcionou a obtenção direta da taxa de coincidência – já que os experimentos anteriores só tinham trabalhado com polarização em apenas um eixo (possivelmente paralelo), obtendo-se as taxas de forma indireta (comentaremos mais a frente sobre a forma de obtenção indireta da taxa de coincidência). Para isto eles usaram quatro fototubos ao invés de dois, dispostos em direções diferentes. Isso fez com que este teste se tornasse uma transposição bastante aproximada do experimento de pensamento proposto por Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm (EPRB). No experimento EPRB, uma fonte emite um par de partículas no estado de singleto (estado emaranhado), nas direções “a” e “b”, conforme esquema abaixo, apresentado no artigo que descreve o experimento em questão:

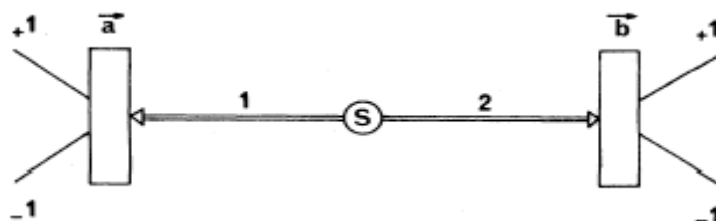


Fig 11: Experimento de pensamento EPRB, in: Aspect, Grangier e Roger 1982, pp. 91.

Essas partículas (1 e 2) são separadas por certa distância, realizando-se medidas de suas componentes de spin. Os possíveis resultados das medidas, para cada uma das direções “a” e “b”, são +1, se o spin for paralelo à direção de emissão (“a” ou “b”), e -1 se for perpendicular. Aspect, Grangier e Roger denominaram $P_{\pm\pm}(a,b)$ as probabilidades de se obter os resultados ± 1 . O coeficiente de correlação é dado pela equação⁷⁸:

$$E(a,b), \text{ onde } E(a,b) = P_{++}(a,b) + P_{--}(a,b) - P_{+-}(a,b) - P_{-+}(a,b).$$

A desigualdade de Bell, com a condição de localidade, apresentada no artigo publicado por Aspect, Grangier e Roger, 1982, pp 91, foi à seguinte⁷⁹:

$$-2 \leq S \leq 2$$

Onde S é dado por⁸⁰:

$$S = E(a,b) - E(a,b') + E(a',b) + E(a',b')$$

Por outro lado, para configurações convenientes, a previsão da MQ, para a quantidade “S” pode alcançar valores de até $\pm 2\sqrt{2}$, em clara discordância com as desigualdades de Bell. Assim os autores (Aspect, Grangier and Roger, 1982) afirmam que a MQ não pode ser completada por nenhuma teoria realística local.

Nos experimentos com apenas dois canais de detecção (analisados anteriormente), realizavam-se medidas da polarização em apenas um eixo, as medidas ortogonais a este eixo eram bloqueadas pelos polarizadores. Assim, a taxa de coincidência era calculada de forma indireta (conforme comentado no início deste capítulo) através da subtração entre as coincidências com os polarizadores e sem os polarizadores. Primeiramente colhiam-se os dados com os dois polarizadores, depois se retirava o polarizador de um dos lados e colhiam-se novos dados, repetindo este procedimento com o outro polarizador e, por fim, colhiam-se os dados com

⁷⁸ Equação retirada do artigo publicado por Aspect, Grangier and Roger 1982, pp91.

⁷⁹ Essa é a generalização das desigualdades de Bell feita por Clauser, Horne, Shimony e Holt, publicada no artigo CHSH.

⁸⁰ A equação abaixo foi retirada do artigo publicado por Aspect, Grangier and Roger 1982, pp91.

ambos os polarizadores retirados. As coincidências acidentais também eram subtraídas das coincidências totais, com o intuito de melhorar a coleta de dados. Esse método trazia uma baixa eficiência para a técnica de detecção e uma pequena aceitação angular – ângulo sólido de detecção dos fótons correlacionados, ou seja, quanto maior a aceitação angular maior é o número de eventos detectados – comparando-o com o método utilizado nos experimentos com quatro canais de detecção (como é o exemplo do experimento analisado aqui neste tópico e do experimento que analisaremos no próximo tópico). Aspect afirma que as medidas anteriores da polarização eram incompletas⁸¹, por que não tem como resgatar as medidas não contadas pelos fototubos, ou as bloqueadas pelos polarizadores.

O experimento analisado neste tópico foi o primeiro com quatro canais de detecção, dois canais para cada orientação. A taxa de coincidência foi calculada de forma direta, já que os dados obtidos eram aplicados diretamente nas equações e os resultados das medidas de polarização paralelas e perpendiculares (+1 e -1) eram efetuados sem a possibilidade de serem bloqueadas. Isto causou uma melhoria na eficiência de detecção (a qual era a mesma para os dois polarizadores de um mesmo canal) e, conseqüentemente, na acumulação de dados. Já nos experimentos anteriormente analisados, se subtraía a taxa de coincidência com e sem polarizadores (conforme já explicado), obtendo-se a taxa de coincidência de forma indireta, além da possibilidade de se bloquear algumas medidas de polarização, paralelas ou perpendiculares, já que se efetuava apenas uma delas.

A técnica de contagem de coincidência também teve que acompanhar a mudança da técnica de detecção. Para se fazer a contagem de quatro canais teve de se utilizar uma técnica de coincidência “fourfold”, ou seja, mede-se a coincidência em quatro canais de detecção.

Essas mudanças proporcionaram o uso de outra desigualdade diferente da apresentada no artigo de Freedman e Clauser (1972), a saber, $-2 \leq S \leq 2$,

81 Aspect, Grangier e Roger, 1981, pp. 92.

sendo “S” igual a $S = E(a,b) - E(a,b') + E(a',b) + E(a',b')$ conforme já foi comentado anteriormente neste tópico.

$E(a,b)$ é dado pela seguinte equação⁸²:

$$E(a,b) = P_{++}(a,b) + P_{--}(a,b) - P_{+-}(a,b) - P_{-+}(a,b).$$

A quantidade $E(a,b)$ é o coeficiente de correlação entre as duas partículas “a” (partícula 1) e “b” (partícula 2). Essa é a generalização das desigualdades de Bell feita por Clauser, Horne, Shimony e Holt, publicada no artigo CHSH.

O coeficiente de correlação utilizado por Aspect, Grangier e Roger, no artigo que descreve o experimento, foi o seguinte, para a técnica de coincidência “fourfold” e apenas uma das quatro orientações escolhidas⁸³:

$$E(a,b) = \frac{R_{++}(a,b) + R_{--}(a,b) - R_{+-}(a,b) - R_{-+}(a,b)}{R_{++}(a,b) + R_{--}(a,b) + R_{+-}(a,b) + R_{-+}(a,b)}$$

Onde $R_{\pm\pm}(a,b)$ é a taxa de coincidência para polarização paralela (+) ou perpendicular (–) nas direções “a” ou “b”. Outras três orientações diferentes foram escolhidas, conforme a equação para o cálculo da quantidade S sugere, $S = E(a,b) - E(a,b') + E(a',b) + E(a',b')$. As equações $E(a',b)$ $E(a,b')$ $E(a',b')$ são similares a $E(a,b)$.

A previsão da MQ para o coeficiente de correlação é a seguinte⁸⁴:

$$E(a,b) = F \frac{(T_1^{\parallel} - T_1^{\perp})(T_2^{\parallel} - T_2^{\perp})}{(T_1^{\parallel} + T_1^{\perp})(T_2^{\parallel} + T_2^{\perp})} \cos 2(a,b)$$

Onde “T” foi definido por Aspect, Grangier e Roger como o coeficiente de transmissão paralela (||) ou perpendicular (⊥) para as direções “1” ou “2”.

A previsão da MQ para a quantidade “S” é:

$$S_{MQ} = 2.70 \pm 0.05$$

⁸² Equação retirada do artigo publicado por Aspect, Grangier and Røpger 1982, pp. 91.

⁸³ Equação retirada do artigo publicado por Aspect, Grangier and Røpger 1982, pp. 92.

⁸⁴ Equação retirada do artigo publicado por Aspect, Grangier and Roger 1982, pp. 93.

Enquanto as teorias na linha das TVOL levam a uma desigualdade do tipo:

$$-2 \leq S \leq 2$$

O valor experimental encontrado foi:

$$S_{\text{exp}} = 2.697 \pm 0.015$$

Mais uma vez, os resultados experimentais apontaram para as previsões da MQ.

2.6 O experimento realizado por Aspect, Grangier e Dalibard (1982).

Todos os experimentos analisados até agora nesta dissertação foram realizados com suas configurações estáticas, onde os polarizadores eram fixos durante todo o voo dos fótons. O experimento agora analisado é o primeiro realizado com polarizadores variando no tempo, seguindo a proposta de Bohm e Aharonov⁸⁵ e do próprio Aspect. Apesar de lançar esta nova proposta, usando um aparato que mudasse as configurações experimentais enquanto os fótons estivessem em voo em outubro de 1976⁸⁶, Aspect só concretiza sua proposta em 1982, com o experimento em questão. Bell insistiu na importância dos experimentos nos quais suas configurações mudassem enquanto os fótons estivessem em voo, propostos por Bohm e Aharonov⁸⁷, pois estes testariam o caráter não local da natureza, caráter este que supostamente poderia levar a um sinal mais rápido que ao da luz.

O experimento analisado neste tópico, Aspect realiza com Jean Dalibard e Gérard Roger, com o título *“Experimental Test of Bell’s Inequalities Using Time-Varying Analyzers”*, no Institut d’Optique Théorique et Appliquée.

⁸⁵ Bohm, D. and Aharonov, Y. Phys. Rev. 108, 1070 (1957). Apud: Aspect, Dalibard and Roger 1982, pp1805.

⁸⁶ Aspect, A. *“Proposed experiment to test the nonseparability of quantum mechanics”*, Phys. Rev., v.14, n°8, 15 October 1976.

⁸⁷ apud Aspect, Grangier e Dalibard 1982, pp1805.

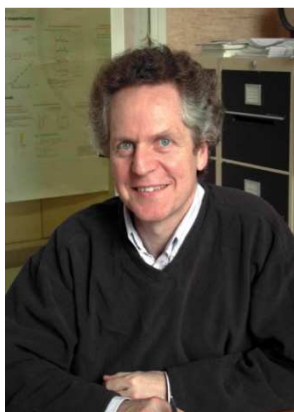


Fig 12: Jean Dalibard, In: http://www.phys.ens.fr/~dalibard/index_en.html, França, em 18/12/2008.

Dalibard concluiu seu doutorado na 'Ecole normale supérieure', em 1981, sob Orientação de Claude Cohen-Tannoudji, em fluorescência de ressonância. Como serviço militar, entrou para a equipe de Aspect, ainda em 1981, realizando o experimento em questão no ano seguinte, no laboratório do *Institut d'Optique Théorique e Appliquée*. Atualmente ele é pesquisador no CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) e trabalha no 'Laboratoire Kastler Brossel', na Ecole normale supérieure, é professor na Ecole polytechnique e membro da 'French Academy of Sciences'⁸⁸.

A técnica de excitação foi à mesma utilizada no experimento anteriormente analisado (realizado por Aspect, Grangier e Roger, 1982), inclusive a cascata e a substância excitada, porém foi necessário diminuir a divergência do feixe, a fim de obter-se um bom funcionamento dos interruptores, já que estes mudavam os fótons rapidamente de um polarizador para outro. Isto implicou na diminuição da quantidade de dados coletados por intervalo de tempo, i.e, na diminuição da taxa de coincidência por segundo. Este fator é importante, já que este é um experimento estatístico, porém não tirou a confiabilidade do resultado experimental eles não puderam manter uma eficiência na coleta de fótons tão boa quanto às

⁸⁸ In: http://www.phys.ens.fr/~dalibard/index_en.html, França, acessado em 18/12/2008.

anteriores⁸⁹, já que tiveram que reduzir a divergência no feixe para conseguir um bom funcionamento dos interruptores.

A técnica de contagem de coincidência também foi à mesma utilizada no experimento anteriormente realizado por Aspect, Grangier e Roger em 1982.

A principal mudança para a análise aqui realizada está na técnica de detecção. Também foram usados quatro fototubos, só que ao invés de dois polarizadores eles utilizaram quatro, um polarizador para cada fototubo, no qual as orientações destes polarizadores eram modificadas após os fótons terem sido emitidos da cascata de cálcio. Isto se dava através de um dispositivo “shutter”, que mudava rapidamente a direção dos fótons de um polarizador para o outro, polarizadores estes pertencentes a uma mesma direção “a” ou “b”. A mudança entre os dois polarizadores ocorrem a cada 10 ns, sendo o tempo de vida no estado intermediário 5 ns. O tempo de mudança entre os polarizadores era menor do que o tempo de vôo dos fótons (40 ns)⁹⁰, seguindo a proposta de mudança da configuração experimental enquanto os fótons estivessem em vôo⁹¹. O redirecionamento da luz de um polarizador para outro é causado por uma onda estacionária ultra-sônica na água (explicaremos melhor o funcionamento deste dispositivo no capítulo seguinte).

Caso os dois interruptores trabalhassem de forma aleatória e não correlacionada, as desigualdades de Bell poderiam ser escritas de forma similar às escritas no artigo CHSH, a saber:

$$-1 \leq S \leq 0$$

Onde:
$$S = \frac{N(a,b)}{N(\infty,\infty)} - \frac{N(a,b')}{N(\infty,\infty')} + \frac{N(a',b)}{N(\infty,\infty)} + \frac{N(a',b')}{N(\infty,\infty')} - \frac{N(a',\infty)}{N(\infty,\infty)} - \frac{N(\infty,b)}{N(\infty,\infty)}$$
⁹².

⁸⁹ Aspect, Grangier and Roger 1981; Aspect, Grangier and Roger 1982.

⁹⁰ Aspect, Dalibard and Roger, 1982, pp. 1805.

⁹¹ Bohm, D. and Aharonov, Y. 1957.

⁹² Equação retirada do artigo publicado por Aspect, Dalibard and Roger, 1982, pp. 1805.

$N(a,b)$, $N(a,b')$, $N(a',b)$ e $N(a',b')$ são as taxas de coincidência nas direções a , b , a' e b' (uma para cada polarizador), $N(a',\infty)$ e $N(\infty,b)$ são as taxas com um polarizador retirado de um dos lados e $N(\infty,\infty)$ é a taxa para todos os polarizados removidos.

No experimento em questão, os interruptores não trabalharam de forma verdadeiramente aleatória, mas quase periódica. Porém, os dois interruptores foram dirigidos por geradores com frequências diferentes, logo, naturalmente, pode-se assumir que eles não estavam correlacionados.

O valor da quantidade “S” encontrada no experimento em questão foi:

$$S = 0,101 \pm 0,020$$

A qual viola claramente as desigualdades de Bell, já que o valor máximo para a quantidade “S” é zero.

De acordo com as previsões da MQ o valor de “S” é igual a:

$$S_{MQ} = 0.112$$

Logo, os resultados desse experimento realizado por Aspect et al, apontaram para as previsões da MQ.

3. A CULTURA MATERIAL DOS EXPERIMENTOS.

Neste terceiro capítulo se concretiza o estudo da cultura material dos seis primeiros testes experimentais do Teorema de Bell que utilizaram fótons ópticos. Este estudo é realizado através de uma análise dos instrumentos que compõem estes referidos experimentos. Nesta análise procuramos entender o que era cada um dos aparatos (conceituando cada um deles de forma simples e precisa, especificando tipo e modelo quando necessário e evitando termos técnicos e específicos), como funcionavam (os processos de funcionamento e, em alguns casos, os princípios físicos envolvidos nestes processos) e quais suas utilidades nos experimentos (seus papéis principais, i.e., suas funções dentro de cada experimento). Em alguns dos aparatos colocamos uma figura representativa (ilustrativa) visando apresentar o aparato ou com intuito de melhor explicar seu funcionamento e/ou fenômeno relacionado. Fizemos também um estudo histórico (quando surgiram) dos aparatos cruciais para a realização dos experimentos, com o intuito de entender como a ciência se desenvolveu neste período e contexto. Buscamos também saber se esses experimentos já poderiam ter sido realizados anteriormente, para, com isso, entender a relação de desenvolvimento que existiu entre teoria, experimentação e instrumentação, dentro deste contexto.

Restringir-nos-emos a descrever apenas os aparatos que estão citados nos artigos que descrevem os experimentos (conforme já foi comentado no início do primeiro capítulo) evitando algum equívoco relacionado a citar aparatos de outro tipo e/ou modelo, ou até mesmo que não foram utilizados nesses experimentos. Nos aparatos que se repetem em mais de um experimento, só o explicaremos uma vez, inclusive seu estudo histórico se for o caso, pelo fato de terem a mesma função. Caso isto não ocorra explicaremos a nova função do aparato no experimento ou se ocorreu mudança no tipo e/ou modelo.

Seis tópicos compõem este capítulo. Cada tópico está relacionado a um experimento, sendo que esses foram dispostos de forma cronológica. Colocamos o esquema de cada um dos experimentos apresentados nos artigos que os descrevem, com o intuito de uma melhor visualização dos aparatos e,

consequentemente, maior entendimento de suas respectivas funções e funcionamentos. Os aparatos também são explicados seguindo certa sequência, começando por aqueles relacionados com a técnica de excitação, depois com os relacionados com a técnica de detecção e, por fim, com os relacionados com a técnica de contagem de coincidências. No final de cada um destes tópicos fazemos uma análise mais geral do referido experimento, buscando responder as perguntas sugeridas no capítulo 1.

3.1 Componentes da Cultura Material do experimento realizado por Freedman e Clauser.

Abaixo temos o esquema do experimental apresentado por Freedman e Clauser no artigo que descreve este experimento:

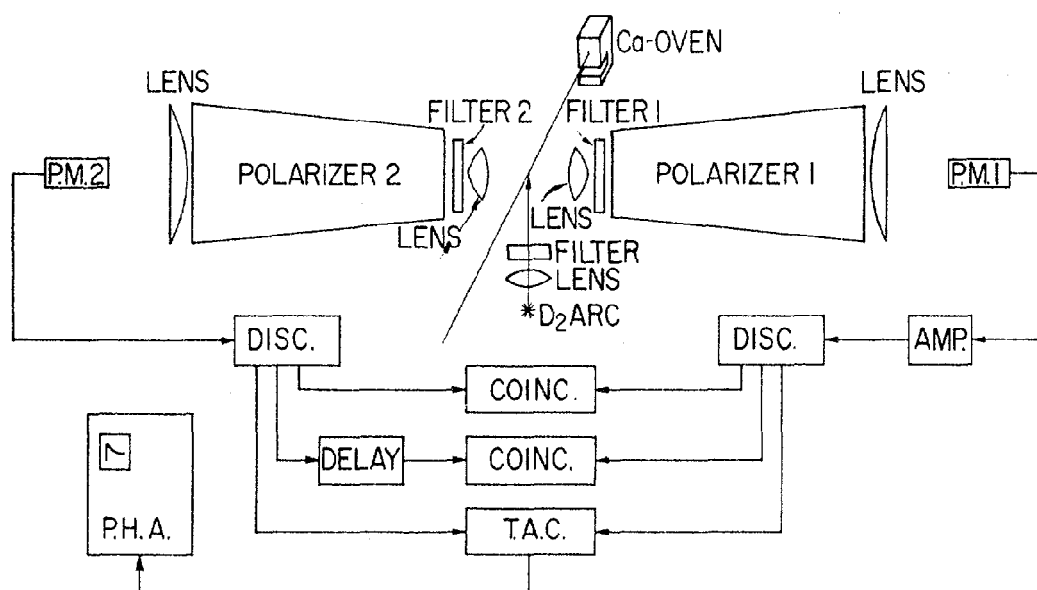


Fig. 13: Esquema do experimento realizado por Freedman and Clauser, in: Freedman e Clauser, 1972, pp939.

A amostra de cálcio, oriunda de um forno de tântalo, era excitada por um feixe de luz (colimado por lentes e devidamente selecionado por filtros de interferência) vindo de uma lâmpada de arco de deutério. Os fótons emitidos

passavam por lentes, filtros e polarizadores, até chegar aos fototubos. Estes transformavam os fótons em pulsos elétricos para que pudessem ser contados pelo circuito de coincidência, o qual se encarregava da seleção e contagem dos eventos válidos.

O forno de tântalo foi usado para evaporar o cálcio, emitindo assim um feixe que posteriormente seria excitado. O cálcio é um material bastante reagente, e de ponto de ebulição relativamente alto (1757 K), logo se faz necessário o uso de um material pouco reagente na fabricação deste forno. O tântalo é um metal com esta característica, devido a seu ponto de fusão ser bastante elevado (3290 K). Os fornos de alta temperatura desenvolveram-se em meados do século XIX, na Alemanha, com o rápido desenvolvimento da indústria siderúrgica. Para a produção de aço de boa qualidade, o rigoroso controle da temperatura dentro dos altos fornos era fator determinante, assim surgiu a necessidade de fornos cada vez melhores⁹³. A origem do nome tântalo vem da mitologia grega – principalmente pela sua característica de estar entre reagentes e não ser afetado por eles – devido a sua similaridade com Tântalo, filho de Zeus e pai de Níobe. Por desagradar aos deuses, Tântalo foi condenado a ficar eternamente com fome e sede, mergulhado de joelhos com água até o pescoço sob uma árvore carregada de frutos. Quando se dobrava para beber, a água drenava e quando levantava as mãos para apanhar frutos, os galhos se moviam para fora do seu alcance.⁹⁴

A Lâmpada de arco de deutério (ORIEL C-42-72-12) excitava o átomo de cálcio por absorção ressonante, o qual, após o decaimento, dava origem ao par de fótons correlacionados (que tinham os seguintes comprimentos de onda 5513 Å e 4227 Å). As lâmpadas de arco, também chamadas lâmpadas de descarga, são lâmpadas que possuem um cátodo e um ânodo que quando submetidos a uma diferença de potencial bastante alta (cerca de 10.000 V) ocorre uma descarga elétrica, excitando assim a substância contida nestas lâmpadas, neste caso o deutério. O material deutério foi descoberto em 1931

⁹³ Osada, Jun'ichi. "*Evolução das idéias da física*", Edgard Blücher, Ed. da USP, São Paulo. 1972. pp 48.

⁹⁴ In: <http://pt.wikipedia.org/wiki/T%C3%A2ntalo>, acessado em 20/12/2007.

por Harold Cayton Urey, um químico da Universidade de Columbia, o que lhe rendeu o Nobel de química, três anos depois da sua descoberta⁹⁵. Logo, o que podemos afirmar é que as lâmpadas de deutério só estavam disponíveis a partir da década de trinta. Contudo, as Lâmpadas de arco foram descobertas no início do século XIX por Humphry Davy, químico inglês que teve como assistente de laboratório Michael Faraday, quando percebeu que um circuito elétrico alimentado por uma potente bateria com dois bastões pontiagudos gerava um arco voltaico com alta luminosidade⁹⁶.



Fig. 14: Várias lâmpadas de arco de deutério ORIEL, Newport Corporation, In: <http://www.newport.com/store/genproduct.aspx?id=378014&lang=1033&Section=Detail#>, acessado em 30/11/2008.

Os filtros de interferência são dispositivos ópticos que refletem uma ou mais linhas (ou bandas) espectrais da luz que incide sobre eles e transmitem outras. Funcionam como seletos de ondas em virtude dos efeitos de interferência que neles ocorrem. Os filtros de interferência, ou interferômetros de Fabry-Pérot, são basicamente formados de uma placa transparente, geralmente de vidro, com duas superfícies paralelas refletoras, onde ocorrem transmissões e reflexões sucessivas (conforme figura abaixo).

⁹⁵ In: <http://fr.wikipedia.org/wiki/deut%C3%A9rium>, acessado em 10/12/2007.

⁹⁶ In: http://pt.wikipedia.org/wiki/H._Davy, acessado em 30/11/2008.

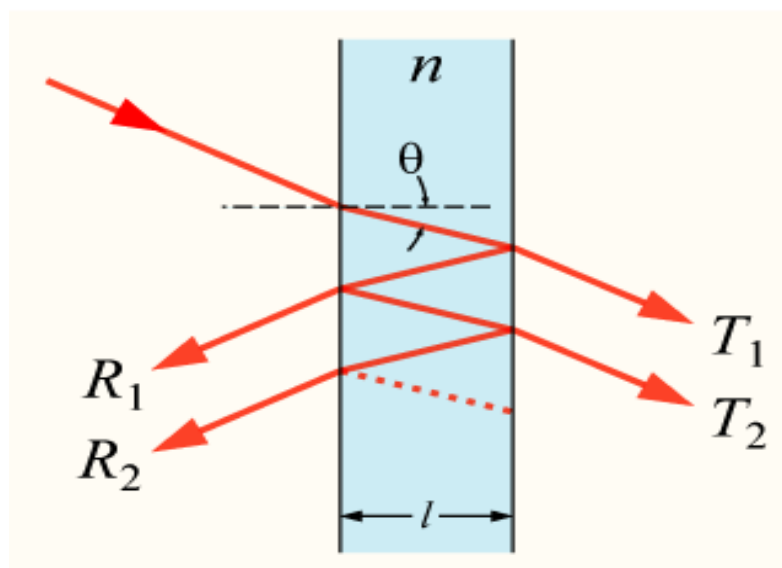


Fig. 15: Esquema de funcionamento do interferômetro Fabry-Pérot. In: http://en.wikipedia.org/wiki/Fabry-P%C3%A9rot_interferometer em 22/12/2007.

Os feixes transmitidos são representados pela letra “T”, “R” representa os feixes refletidos, “n” o índice de refração do vidro, “l” a espessura do vidro e “θ” o ângulo entre o feixe refratado e a reta normal à superfície do vidro. A seleção dos feixes transmitidos é feita através das interferências entre as múltiplas reflexões da luz que ocorrem entre as superfícies refletoras. A diferença de fase entre cada reflexão sucessiva é dada por $\delta = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) 2 \cdot n \cdot l \cdot \cos\theta$ onde λ é o comprimento de onda da luz. Se os feixes T1 e T2 estiverem em fase ocorre interferência construtiva, logo eles serão transmitidos, caso contrário os feixes serão refletidos. Foram usados diversos filtros neste experimento, cada um com sua função específica. O filtro 250Å FWHM (full width at half maximum, que pode ser traduzido como largura total à meia altura), tinha como função selecionar a luz oriunda da lâmpada de arco de deutério adequada (com comprimento de onda de 2275 Å) para a excitação desejada do cálcio. Este filtro tinha 20% de transmissão a 2275 Å, o que quer dizer que, desconsiderando as perdas, 80% do feixe é refletido e 20% transmitido, quando incide sobre ele luz com comprimento de onda de 2275Å. O filtro de 10Å, selecionava os fótons com comprimento de onda de 5513Å pertencentes ao par correlacionado. O filtro de 6Å selecionava os fótons com comprimento de onda de 4227Å, também pertencentes ao par correlacionado. Os filtros de interferência são baseados no interferômetro de

Fabry-Pérot, assim denominados em homenagem aos físicos franceses Maurice Paul Auguste Charles Fabry e Jean-Baptiste Alfred Pérot, por terem construído o primeiro interferômetro em 1897, sendo este dispositivo originado da teoria de interferência de multi-feixes, desenvolvida por Fabry em 1890-92. O primeiro interferômetro de Fabry-Pérot era constituído de duas placas de vidro, finas e perfeitamente planas, cobertas em suas faces paralelas por finos filmes de prata⁹⁷. Na figura abaixo temos uma fotografia do primeiro interferômetro construído por Fabry e Pérot.

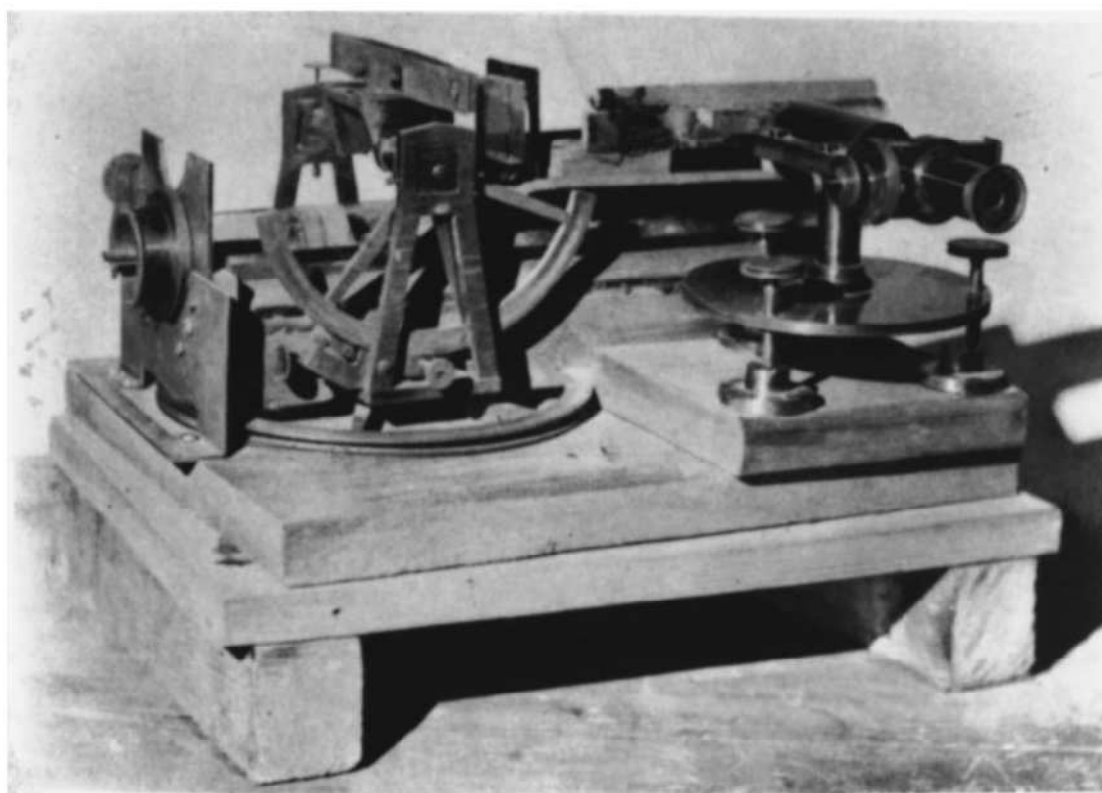


Fig. 16: Primeiro interferômetro Fabry-Pérot, modelo original, 1898: In Mulligan 1998, pp. 800, op. cit. nota 49.

Com o desenvolvimento da técnica de deposição de filmes de materiais dielétricos, com espessura controlada e de vários índices de refração, foi possível desenvolver filtros de interferência, na sua forma atual.

O aparato a ser analisado agora são as lentes primárias anaesféricas. As lentes primárias são assim chamadas pelo fato de serem as primeiras a

⁹⁷ Mulligan 1998, pp. 797. In: <http://www.physics.rutgers.edu/ugrad/387/Mulligan98.pdf> (USA) acessado em 26/11/2008.

receber a luz vinda da fonte. Já a nomenclatura anaesféricas é dada às lentes que se afastam do formato esférico, reduzindo assim as aberrações esféricas (devido a esse efeito, onde deveria ver um ponto vê-se uma mancha). Existe também a necessidade de concentrar o feixe no menor volume possível, para que seja aproveitado o maior número de átomos possíveis na saída do forno, aumentando assim a “eficiência da contagem”. Logo, isto se consegue com o uso de lentes, colocadas na saída do forno.

Polarizadores de placas empilhadas (“pile-of-plates”) são lâminas de vidro inclinadas próximo ao ângulo de Brewster. Em cada lâmina polarizadora ocorrem duas reflexões, uma em cada face, conforme figura 2. Nessas lâminas, uma parte da luz é refletida com certa polarização “s” e a outra é transmitida com outra polarização “p”. Foram usadas dez lâminas no experimento em questão, cada uma com 0.3mm de espessura. Essas lâminas estavam juntas por quadros articulados com dobradiças, i.e, cuja orientação pode ser modificada. Tinham a função de indicar a polarização dos fótons que passavam por elas. O fenômeno da polarização da luz por reflexão foi descoberto por Etienne Louis Malus – um físico francês, oficial, engenheiro e matemático – o qual publicou seus trabalhos em 1809⁹⁸. Não temos uma data precisa de quando os primeiros polarizadores do tipo placas empilhadas foram descobertos, porém nossa conjectura é que os primeiros polarizadores deste tipo só começaram a se desenvolver depois da descoberta do fenômeno da polarização da luz por reflexão.

⁹⁸ In: http://en.wikipedia.org/wiki/Etienne-Louis_Malus, Wikipédia (English), em 18/12/2008.

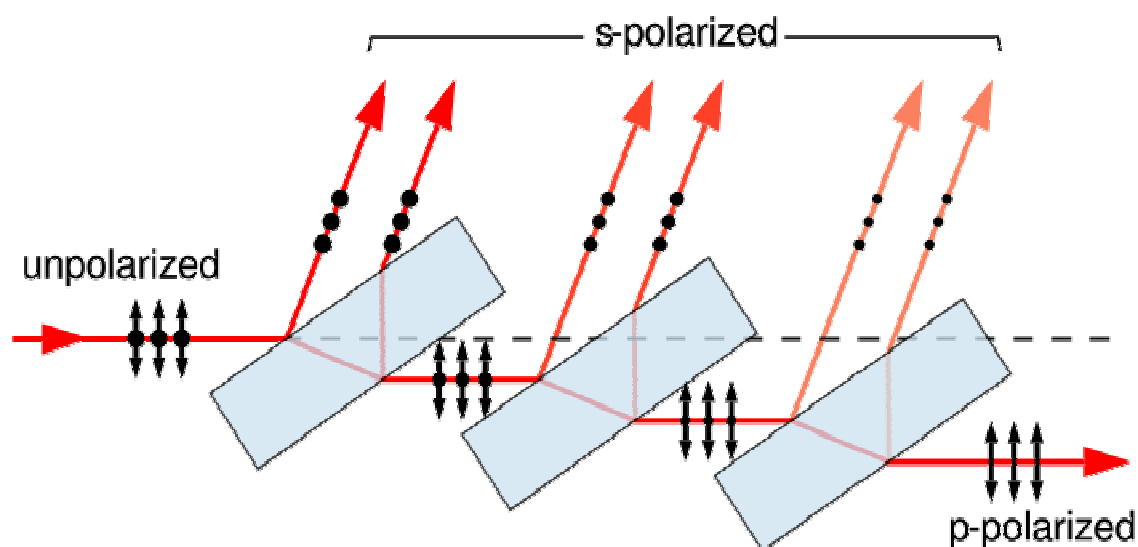


Fig 17: Esquema de funcionamento dos polarizadores pilhas de placas, In:

http://en.wikipedia.org/wiki/Polarizer#Notes_and_references, acessado em 25/12/2007.

O “Mecanismo Geneva” é um mecanismo que contém uma cruz de “Malta” (ou “Maltese”, como é citada no artigo Freedman e Clauser, 1972) ligada a dois discos sobrepostos e colados, conforme figura abaixo (Fig 18). O disco menor possui um corte circular que se alinha com a cruz de malta, já o disco maior contém um pino que encaixa na fenda da cruz, girando-a num certo incremento (ângulo). A cruz de “Malta” e os discos são ligados a eixos, que transmitem o movimento do mecanismo Geneva no incremento desejado. A função deste mecanismo no experimento em questão é girar cada polarizador num incremento de $22,5^\circ$, incluindo assim os ângulos de maior violação das desigualdades de Bell ($22,5^\circ$ e $67,5^\circ$), já que para alguns ângulos de 0° e 90° , entre os polarizadores e o plano de polarização, não ocorrem violações. O nome deriva de sua aplicação em relógios mecânicos, primeiramente realizada na cidade de Genebra, Suíça, onde se iniciou um importante centro de fabricação de relógios mecânicos. Esses mecanismos também são utilizados em projetores de filmes, sendo que os primeiros a

serem utilizados para este fim foram usados antes de 1896, para os projetores de Oskar Messter e Max Gliewe e no “Teatrogrph” de Robert William Paul⁹⁹.

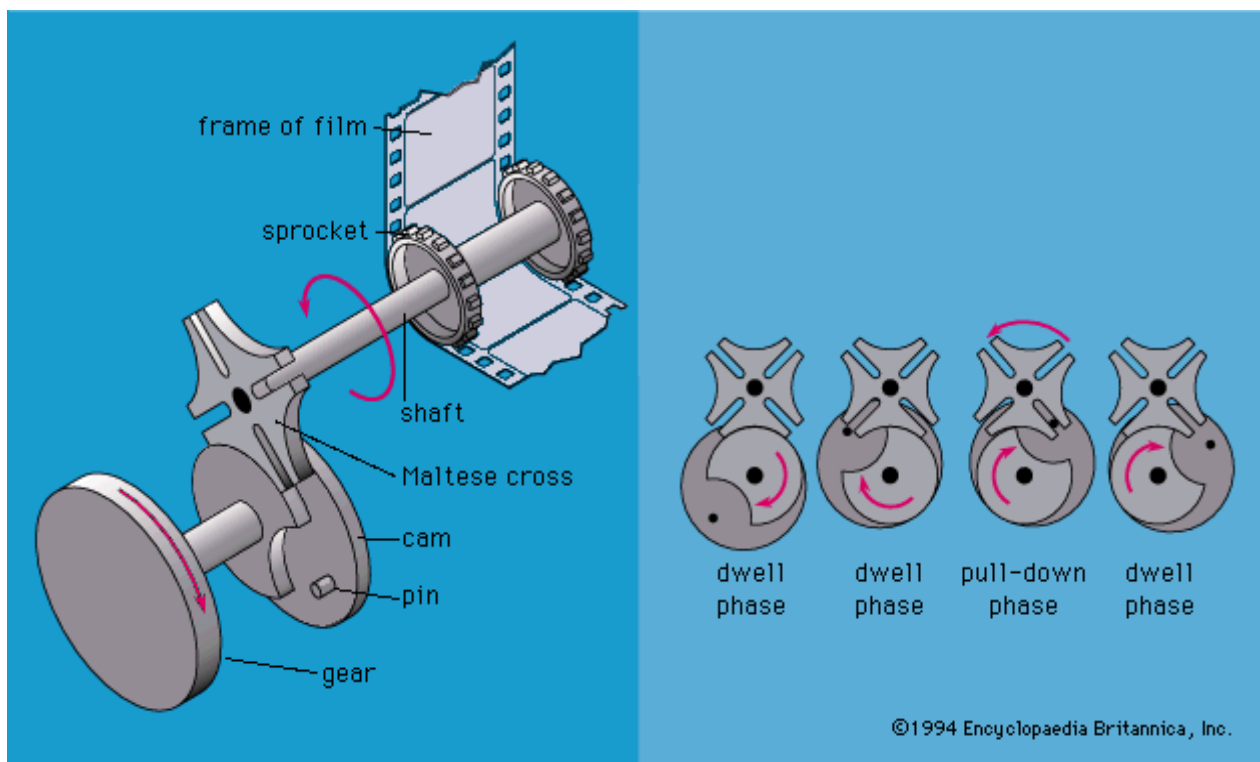


Fig 18: Esquema de funcionamento do mecanismo Geneva. In: <http://www.britannica.com/eb/art-2554/Intermittent-Geneva-movement>, em 28/12/2007.

Tubos Fotomultiplicadores, ou fototubos, são tubos de vidro sob vácuo, que absorvem a luz (fótons) que incide sobre eles e a transformam em pulsos elétricos (elétrons), através de um fotocátodo (devido ao efeito fotoelétrico). Estes elétrons se chocam com dinodos e em cada um destes choques um elétron desloca de 3 à 4 novos elétrons, que são acelerados até o próximo dinodo, repetindo este processo sucessivamente, até atingirem o anodo, conforme figura 11. O cintilador (scintillator) é um material que produz luz ao ser atravessado por partículas muito energéticas como, por exemplo, partículas cósmicas, prótons, raios Gama, etc. Acoplado a um fotomultiplicador, ele forma um excelente detector dessas radiações.

⁹⁹ In: http://en.wikipedia.org/wiki/Geneva_mechanism, (english) em 5/12/2008.

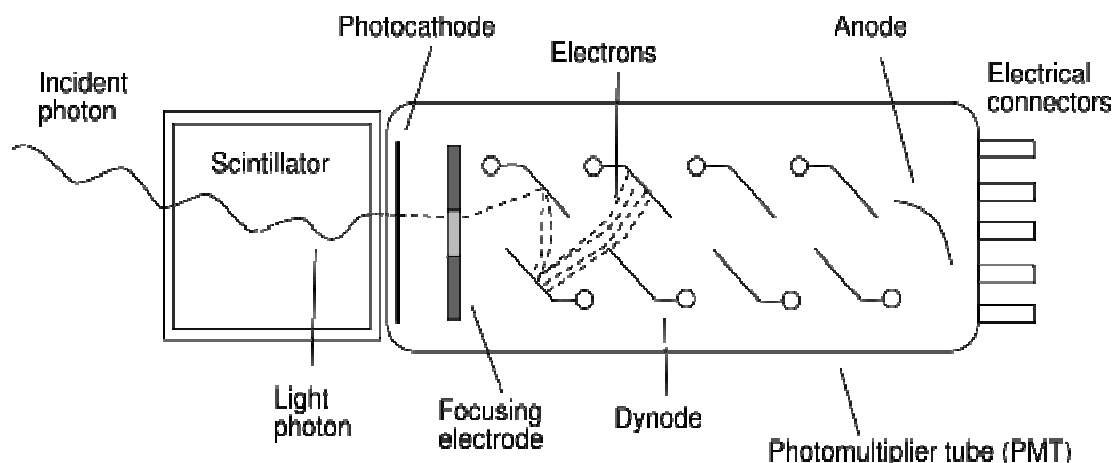


Fig 19: Esquema de funcionamento do Tubo fotomultiplicador (photomultiplier), in <http://en.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier>, (english), acessado em 18/12/2008.

A função dos fototubos era detectar os fótons incidentes e transformá-los em pulsos elétricos para que pudessem ser analisados pelo circuito de coincidência. No “handbook” da Hamamatsu (empresa fabricante de fototubos) encontramos uma referência do primeiro tubo fotomultiplicador criado, o que ocorreu em 1930, sendo seus criadores Koller e Campbell. Desde então, vários fototubos foram desenvolvidos. Contudo, para o experimento em questão, como afirmou Freedman (in Gilder 2008, pp266), os fototubos utilizados foram os “quanticons” (fototubos que faziam contagens de fótons únicos) e estes tinham acabado de ser desenvolvidos pela RCA (empresa que fabricava estes fototubos).

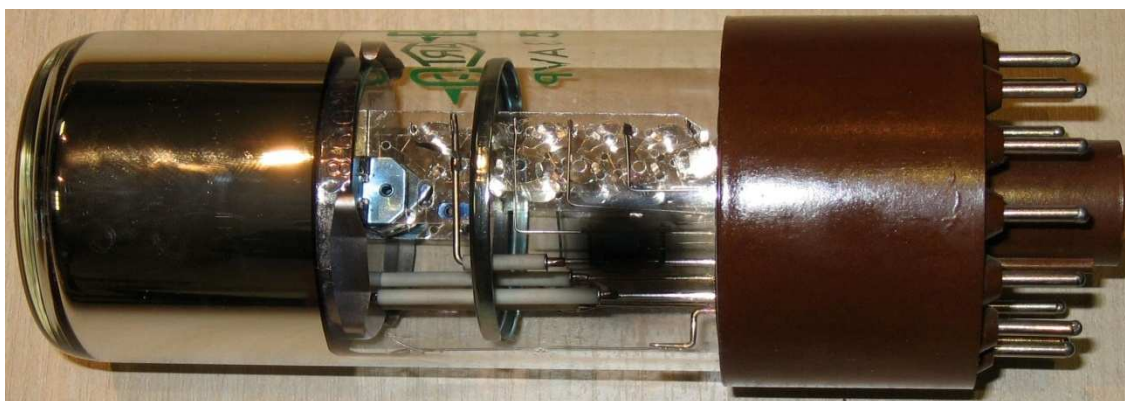


Fig 20: Fotografia de um fototubo, in: <http://en.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier>, acessado em 18/12/2008.

Discriminadores são circuitos que selecionam unicamente os sinais de interesse, aqui picos oriundos dos tubos fotomultiplicadores, de maneira a eliminar eventos não válidos.

O Circuito de coincidência é um aparato eletrônico que tem por finalidade detectar, gravar e fazer a contagem dos pulsos elétricos emitidos pelos fotomultiplicadores. Esta técnica verificava se o par detectado era, realmente, o par de fótons emitidos do decaimento em cascata no cálcio. A verificação era feita através da janela de coincidência (tempo de médio de duração entre as emissões dos dois fótons, que neste experimento era de 8,1 ns, conforme já comentado no capítulo 2.1) existente entre os fótons correlacionados. Assim fazia-se a contagem dos pares de fótons correlacionados, os dados coletados eram aplicados nas equações encontradas no artigo que descreve o experimento¹⁰⁰ e com isso verificava-se as previsões dadas pela MQ e pela TVOL. Este dispositivo foi criado por Bruno Rossi, em 1930, trabalhando com física de raios cósmicos em Arcetri, Universidade de Florença. Sua fonte primária de inspiração foi o artigo de W. Bothe e W. Kolhörster, publicado na Z. Physik 56, 751 (1929), já que o próprio Rossi afirmou que este artigo abriu um novo caminho para um território ainda não conhecido, com oportunidades ilimitadas de exploração, o que ele fez foi rapidamente explorar essas oportunidades¹⁰¹. Rossi percebeu que o método de coincidência usado por Bothe e Kolhörster poderia ser bastante melhorado se fosse desenvolvido uma maneira de gravar as coincidências, o que poderia proporcionar um melhor tempo de resolução, nascendo assim o circuito de coincidência clássico¹⁰². Vale ressaltar que em 1924 Bothe e Geiger realizaram experimentos com o Efeito Compton no qual no qual utilizaram a idéia de contagem de coincidência. No método utilizado por Bothe e Geiger, os pulsos oriundos dos dois contadores eram registrados em filmes fotográficos¹⁰³ e depois analisados a olho nu, sem nenhum registro eletrônico. Vale ressaltar que o método de coincidência foi o principal motivo pelo qual Bothe ganhou,

¹⁰⁰ Freedman, S. J. and Clauser, J.F. (1972) "Experimental Tests of Local Hidden-Variable Theories" *Physical Review Letters* 28(14):938-41, (1972).

¹⁰¹ Physics Today, 34-10, October 1981, pp35.

¹⁰² Physics Today, 34-10, October 1981, pp35-6.

¹⁰³ Bothe 1955, pp 861.

juntamente com Max Born, o Prêmio Nobel de Física em 1954, sendo Bothe muitíssimo agradecido a Geiger por esta conquista¹⁰⁴. Analisando o livro “Nascimento da Física” de José M^a Filardo Bassalo, não vimos nenhuma referência à criação do circuito de coincidência por Bruno Rossi. Isto nos leva a refletir sobre a importância do estudo da cultura material na história das ciências, pois sem a criação do circuito de coincidência estava descartada a possibilidade de um experimento realizável com fótons ópticos que testasse as desigualdades de Bell.

As contagens dos fótons eram gravadas numa fita de papel e analisadas num computador IBM 1620-II. No início dos anos 70 poucos computadores eram associados aos experimentos, um dos principais motivos é que estes eram equipamentos caros, além de existir poucos para aquisição.

O Conversor Tempo-Amplitude (Time-to-amplitude convertor) media o tempo de atraso entre dois sinais emitidos pelos fototubos – que era utilizado para fazer o espectro de resposta (contagem realizada pelo circuito de coincidência em função do tempo entre dois eventos), o que verificava a validade dos eventos e assim o bom funcionamento do circuito de coincidência. Era um circuito que tinha como dispositivo básico um capacitor que dispara quando alcança certa tensão.

Um Analisador de Altura de Pulso (Pulse Height Analyzer) era um dispositivo eletrônico que verificava a validade dos eventos particularmente, evitando que dois ou mais eventos simultâneos, por acaso, (que não pertence, realmente, a um par de fótons correlacionados) sejam considerados coincidência. Normalmente um único fóton gera no fototubo uma corrente unitária “i”, no caso de dois eventos simultâneos não desejados, esta corrente dobra e assim o PHA elimina esses eventos.

Um segundo canal de contagem de coincidência foi utilizado para medir as coincidências acidentais. Este procedimento era realizado através de um circuito de retardo de eventos chamado “Delay”. Este circuito era ligado entre

¹⁰⁴ Fick and Kant, 2008, pp 3.

um dos dois discriminadores e o circuito de coincidência, causando um atraso nas coincidências. Como estas coincidências tinham um retardo, não poderiam ser contadas como coincidências verdadeiras, logo estes dados seriam considerados coincidências acidentais.

O estudo da CM deste experimento nos mostrou que o fototubo e o circuito de coincidência foram desenvolvidos em 1930 (embora os quanticons terem sido desenvolvidos no início da década de 1970) e que os outros aparatos que compõem o experimento em questão já tinham sido desenvolvidos anteriormente a essa data. Fazendo agora uma análise das técnicas utilizadas no experimento em questão, a de excitação só poderia ser utilizada a partir de 1931, pois mesmo que as lâmpadas de arco tenham sido desenvolvidas no início do século XIX (conforme discutido no tópico 2.1), o deutério (material que constituiu a lâmpada usada na excitação) só foi descoberto em 1931. A técnica de detecção estava diretamente associada aos aparatos (filtros, polarizadores e lentes) e era constituída de procedimentos simples, exceto pela técnica de detecção de fótons únicos, que segundo Freedman (in Gilder 2008, pp 266), só foi desenvolvida, a ponto de se realizar contagens eficientes, no início da década de 1970, logo podemos afirmar que esta técnica só estava bem desenvolvida por volta de 1970. A técnica de contagem de coincidência não estava aperfeiçoada o suficiente para fazer contagens com uma janela de coincidência tão precisa quanto a que foi realizada no experimento em questão. Isto porque, entre os anos trinta até meados dos anos quarenta, a eletrônica era baseada no uso de válvulas eletrônicas. Esta eletrônica não era muito eficiente, pois trabalhava na frequência da ordem do megahertz (tempo de resposta da ordem do microsegundo). Com o desenvolvimento do transistor em 1948¹⁰⁵ – nos laboratórios da Bell Telephone, EUA, pelos físicos Walter Brattain, John Bardeen e William Shockley, o que lhes rendeu o Premio Nobel de 1956¹⁰⁶ – foi possível realizar circuitos com o tempo de resposta na escala de alguns nanosegundos. Podemos então afirmar que o desenvolvimento do transistor

¹⁰⁵ In: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Trans%C3%ADstor>, Wikipédia, acessado em 29/07/2009 e <http://www.forumpcs.com.br/coluna.php?b=125503>, acessado em 29/07/2009.

¹⁰⁶ ,Fundação Nobel, acessado em 29/07/2009.

proporcionou um aperfeiçoamento bastante significativo na eletrônica. Para o experimento em questão, essa melhoria era essencial, já que se tinha a necessidade de uma janela de coincidência de 8,1 nano segundos.

3.2 Componentes da Cultura Material do experimento realizado por Clauser.

A seguir o esquema experimental apresentado por Clauser no artigo que descreve o experimento:

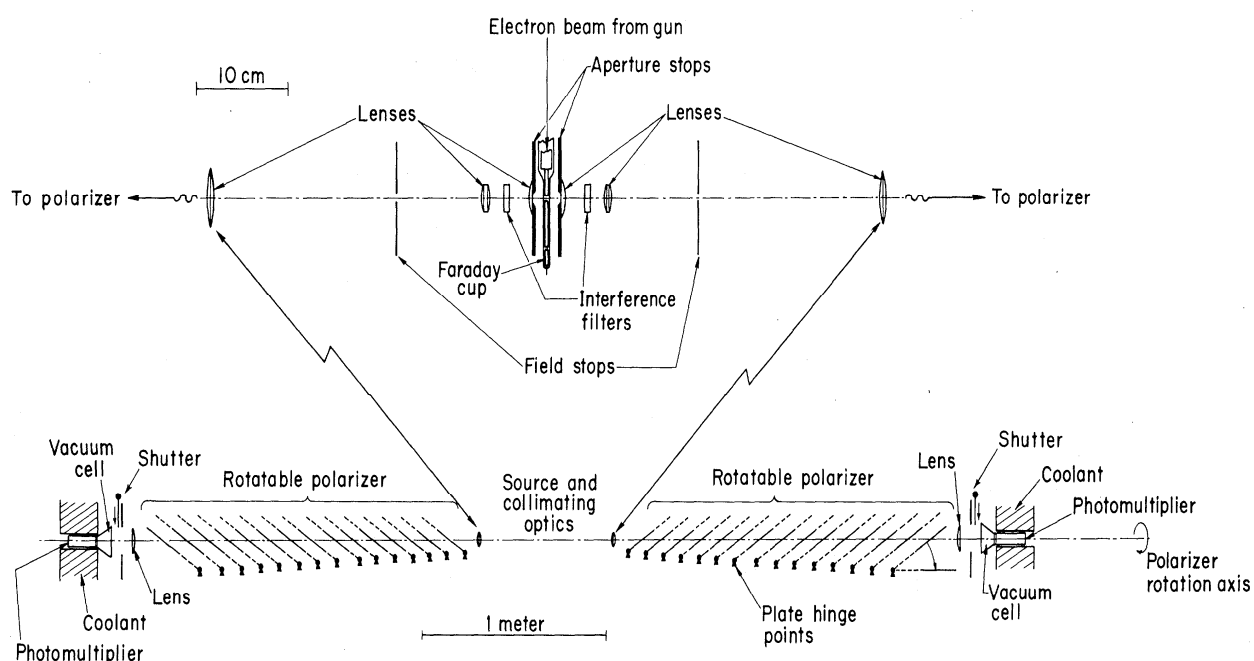


Fig 21: Esquema do experimento realizado por Clauser.

Bastante parecido com o experimento anterior, os fótons correlacionados emitidos do decaimento em cascata passavam por lentes, filtros e polarizadores até chegar aos fototubos, que os convertiam em pulsos elétricos para serem analisados e contados pelo circuito de coincidência. No esquema acima não aparece o circuito de coincidência pelo fato de ter sido o mesmo utilizado por Freedman and Clauser 1972.

Neste experimento um decaimento em cascata no átomo de mercúrio produzia o par de fótons correlacionados. O mercúrio ficava contido num bulbo de pyrex. Este bulbo era o local onde ocorria a excitação, também chamado “região de interação”. Foi usado um mercúrio de pureza isotópica elevada (91% de Hg^{202} , 2,1% de Hg^{199} e 2,2% de Hg^{201}), para reduzir os efeitos da interação hiper-fina dos elétrons com o núcleo, de maneira a garantir a correlação dos dois fótons emitidos na cascata, já que o Hg^{202} tem momento angular total igual à zero.

O “Servo Loop” (elo de realimentação) é um dispositivo de estabilização da corrente elétrica do feixe de elétrons, os quais bombardeavam o mercúrio para a produção dos pares de fótons correlacionados. Este dispositivo garantia uma taxa de produção de pares de fótons correlacionados estável.

Os polarizadores foram do tipo placas empilhadas (já explicado anteriormente no tópico 3.1), os mesmos usados por Freedman e Clauser no experimento anterior, porém o número de placas aumentou para quinze, já que no experimento anterior ele tinha usado dez placas.

Para o experimento em questão, foram utilizados três fototubos (a história dos fototubos já foi explicada no tópico 3.1). Dois destes para detecção dos fótons correlacionados, o RCA 8850 para o fóton com comprimento de onda de 4046\AA e o RCA C31000E para o fóton com comprimento de onda de 5676\AA . Estes dois fototubos foram resfriados com o intuito de reduzir o ruído de fundo (emissão espontânea de elétrons devido à temperatura, o primeiro (RCA8850) a 0°C e o segundo (RCA C31000E) a -80°C). O terceiro fototubo foi usado para estabilizar a corrente do feixe de elétrons, de modo que, se a emissão de fótons fosse baixa o fototubo aumentava a corrente, o que fazia com que a emissão de fótons aumentasse, caso contrário o fototubo diminuía a corrente, diminuindo assim a emissão de fótons.

Bobina de Helmholtz são duas bobinas circulares, planas, contendo N espiras percorridas por correntes no mesmo sentido, que produzem um

campo magnético uniforme de baixa intensidade sobre um volume relativamente grande. Era usada para manter o campo magnético abaixo de 50 mG numa certa região, no caso deste experimento, buscava eliminar o campo magnético terrestre, pois como os estados excitados tinham momento magnético não nulo ($J=1;J=1$), este campo poderia influenciar na polarização da luz. Vale ressaltar que este aparato não é bem explicado no artigo que descreve o experimento em questão. Esta bobina tem este nome em homenagem a Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894), por tê-la idealizado¹⁰⁷.



Fig 22: Bobina de Helmholtz. In: Robert, R. “*Bobina de Helmholtz*”, RBEF, v.25, Março, 2005. pp 43. Dados desta bobina: $R = 0,528\text{m}$ e $N = 230$ espiras, corrente máxima admissível para trabalho contínuo é 2,5 A.

Os filtros de interferência (já explicado anteriormente no tópico 3.1) selecionavam os fótons emitidos pela cascata, sendo que os FWHM 50 Å selecionava os fótons com comprimento de onda de 5676 Å e os FWHM 7,5 Å os de 4046 Å.

¹⁰⁷ In: Robert, R. “*Bobina de Helmholtz*”. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 25, Março de 2003, pp. 40.

A célula de vácuo (vacuum cell) é um invólucro de vidro no qual o tubo fotomultiplicador estava inserido.

Como detectores, Clauser também usou tubos fotomultiplicadores (já explicados no tópico 3.1), porém o tipo e modelo mudou, já que os fótons pertencentes ao par correlacionado tinham outro comprimento de onda, por serem emitidos de uma cascata de mercúrio e não de cálcio como no experimento anteriormente realizado por Freedman e Clauser, 1972. Os tubos fotomultiplicadores foram resfriados por um fluido (Coolant), pois estes trabalhavam a temperaturas muito baixas, como por exemplo, o RCA C31000E a -80°C . Era importante manter esses fototubos nestas temperaturas para reduzir a emissão espontânea de elétrons do fotocátodo. Cada fototubo trabalhava a uma temperatura diferente, já que o trabalho de extração, também chamado “função trabalho”, (que é a energia necessária para retirar um elétron da superfície de certa substância) para o RCA 8850 é maior do que para o RCA C31000E, sendo que este trabalhava a temperatura de -80°C e aquele a 0°C .

O circuito de coincidência foi o mesmo usado no experimento realizado por Freedman e Clauser 1972, logo, seu funcionamento, o que este circuito era, o papel que desempenhava no experimento e sua história já foram explicados anteriormente no tópico 3.1.

A cápsula de Faraday é um tipo de eletrodo que recolhe os elétrons do feixe que realizava a excitação. Consiste de uma câmara metálica condutora que intercepta este feixe. Tinha como função recolher os elétrons para evitar que estes se acumulassem, evitando perda de eficiência na excitação, já que as cargas elétricas repeliriam o feixe.

Bem como no experimento anteriormente analisado (Freedman e Clauser 1972), todos os aparatos já estavam disponíveis desde 1930, exceto pelos quanticons que só foram desenvolvidos por volta de 1970. A técnica de detecção estava diretamente ligada aos aparatos, logo, devido aos quanticons, só foi aperfeiçoada por volta de 1970 e a técnica de contagem de

coincidência ainda não estava aperfeiçoada a ponto de se obter uma janela de coincidência aceitável (para o experimento em questão a janela de coincidência era de 12,93 ns)¹⁰⁸, conforme já discutido no tópico anterior (3.1). Já na técnica de excitação o fato da amostra excitada ter sido mercúrio e não cálcio levou este experimento a ser preparado de maneira mais minuciosa que o anterior. Podemos notar isto comparando a quantidade de aparatos utilizados da técnica de excitação dos dois experimentos, bem como os procedimentos utilizados para realizá-las. O experimento realizado por Clauser utilizou um canhão solenoidal de elétrons para realizar a excitação e um terceiro fototubo para manter a corrente estabilizada, Freedman e Clauser utilizaram uma lâmpada de arco de deutério, filtros e lentes. Clauser também utilizou uma cápsula de Faraday (para retirar partículas indesejadas, conforme já discutido neste tópico) e uma bobina de Helmholtz (para manter a intensidade do o campo magnético baixa na região de excitação, também já discutido neste tópico) com intuito de tornar o experimento mais confiável, já no experimento realizado por Freedman e Clauser, não houve a necessidade de utilizar esses aparatos. Vale ressaltar que esta técnica já estava disponível, a ponto de ser utilizada no experimento em questão, em 1930.

3.3 Componentes da Cultura Material do Experimento realizado por Fry e Thompson.

Abaixo temos o esquema experimental apresentado por Fry e Thompson no artigo que descreve o referido experimento:

¹⁰⁸ Clauser 1976, pp1225.

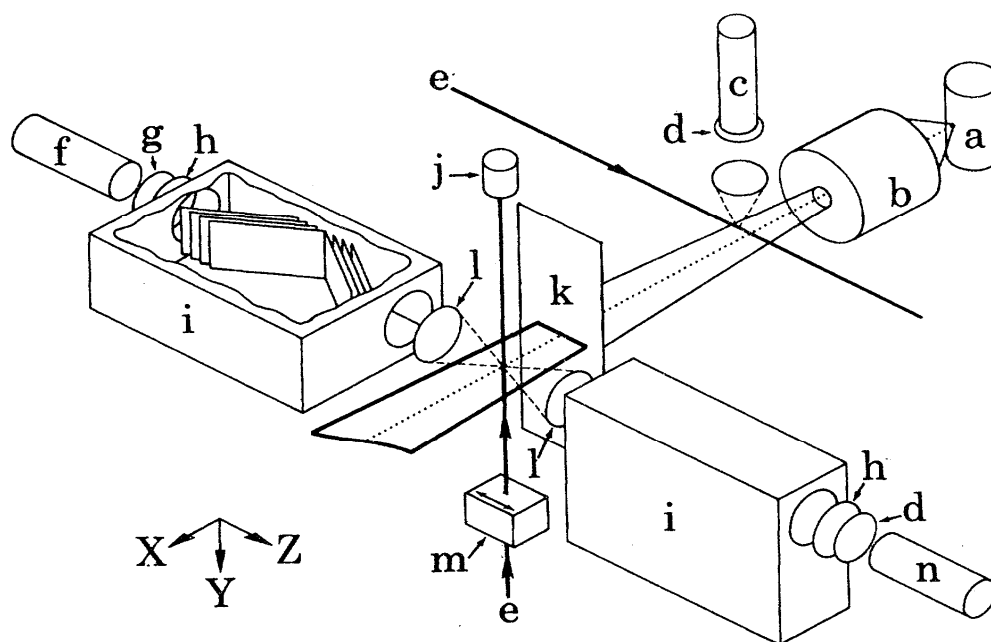


Fig 23: Esquema do experimento realizado por Fry e Thompson: a) Forno de mercúrio; b) Canhão solenoidal de elétrons; c) Fototubo RCA8575; d) Filtro de interferência de 4358 Å; e) Feixe de laser de 5461 Å; f) Fototubo Amperex 56 DUVP/03; g) Filtro de interferência de 2537 Å; h) Lentes focalizadoras; i) Polarizadores de placas empilhadas; j) Armadilha de feixe de laser; k) Fenda definidora de feixe atômico; l) Lente coletora de luz; m) Cristal polarizador; n) Fototubo RCA 8850.

Notemos que neste esquema experimental não aparece o circuito de coincidência, devido ao fato de também ter sido o mesmo circuito utilizado por Freedman e Clauser (tópico 2.1). Para emitir o par de fótons correlacionados em polarização, o mercúrio passou por dois processos de excitação em locais diferentes, totalizando duas regiões de interação, diferente dos dois experimentos analisados anteriormente que tiveram apenas uma região de interação. Esses fótons, após passar por lentes, filtros e polarizadores, eram transformados em pulsos elétricos pelos fototubos e assim o circuito de coincidência realizava a contagem dos eventos válidos.

Um forno foi usado para evaporar a amostra de mercúrio, análogo ao forno de tântalo usado para evaporar o cálcio no experimento realizado por Freedman e Clauser (1972). Este forno emitia um feixe que posteriormente seria excitado.

O canhão solenoidal de elétrons excitava o feixe de mercúrio, através do choque destes elétrons com os átomos de mercúrio, quando esse passava por ele, realizando o primeiro passo da excitação. A idéia era fazer um feixe colimado de elétrons, o que é possível com um campo magnético. O aparato em questão (canhão solenoidal) não é bem explicado no artigo.

Os filtros de interferência 4358 Å e 2537 Å (explicados anteriormente no tópico 3.1) só deixavam passar fótons com estes respectivos comprimentos de onda, selecionando os devidos fótons pertencentes ao par correlacionado.

O laser sintonizável era de corante e emitia um feixe com comprimento de onda de 5461 Å, na faixa do visível, usado no segundo passo da excitação. Ele era mono-modo (de modo único, isto é, possuindo uma linha única de emissão espectral) e sintonizável, de maneira a excitar o único isótopo do mercúrio (Hg^{200}). Os primeiros lasers foram colocados em operação em 1960¹⁰⁹, porém Peter Sorokin e John Lankard, em 1965, desenvolveram o material principal para que o laser sintonizável fosse constituído, o qual só foi terminado alguns anos depois¹¹⁰.

Armadilha de feixe de laser era um obstáculo que aprisionava o feixe para evitar os acidentes oculares com os operadores, por uma questão de segurança, isto porque o feixe era bastante potente (intensidade máxima de 250mW/cm²), já que este não é inofensivo.

Fenda definidora do feixe atômico era usada para colimar o feixe atômico de mercúrio. No artigo que descreve o experimento em questão não aparece uma explicação clara do que era a sua função. Provavelmente era uma fenda feita numa placa metálica, usada para definir com mais precisão a região de interação.

As lentes coletoras de luz focalizavam a fluorescência oriunda do feixe de mercúrio na região de interação com o laser.

¹⁰⁹ Bromberg 2006, pp. 240

¹¹⁰ Freire 2006, pp. 601.

Os polarizadores de placas empilhadas já foram explicados anteriormente no item 3.1. No experimento em questão, cada polarizador continha sete placas (sendo dois polarizadores no total) simetricamente arranjadas de modo a cancelar a transferência do raio externo deslocado.

As lentes focalizadoras, como o próprio nome já sugere, focalizavam a luz incidente nos fototubos, visando maior coleta de dados e assim obter maior aproveitamento estatístico.

O tubo fotomultiplicador (já explicado anteriormente) RCA8850, detectava o fóton com comprimento de onda maior, já o Amperex 56 DUVP/03 foi usado para detectar o fóton com comprimento de onda menor. O terceiro tubo fotomultiplicador (RCA 8575) (conforme explicado anteriormente no item 2.3) gerenciava um laço de realimentação, o qual tinha como função estabilizar a corrente elétrica que realizava o primeiro passo da excitação, garantindo assim a fluorescência máxima do experimento.

O conversor tempo-amplitude, o analisador de altura de pulso e o circuito de coincidência já foram explicados anteriormente no tópico 3.1.

Exceto pelo laser sintonizável e pelos quanticons, todos os aparatos que compõem este experimento já estavam disponíveis desde 1930. Como vimos neste tópico (3.3) o laser sintonizável foi desenvolvido em 1965, logo podemos afirmar que este experimento só poderia ter sido realizado, com a mesma precisão estatística, a partir desta data. A introdução de laser sintonizável causou uma melhoria bastante significativa na acumulação de dados e no tempo de realização dos experimentos, conforme já discutido no tópico 2.3 desta dissertação. A técnica de excitação, por estar diretamente ligada aos aparatos, só estava disponível na década de 1960, devido ao laser ter sido desenvolvido nesta década, sendo ele o principal aparato utilizado na excitação. A técnica de detecção e a técnica de contagem de coincidência seguem a mesma análise feita anteriormente no experimento realizado por Freedman e Clauser no tópico 3.1.

3.4 Componentes da Cultura Material do primeiro experimento realizado por Aspect, Grangier e Roger (1981).

A seguir temos o esquema experimental apresentado por Aspect, Grangier e Roger no artigo que descreve o experimento¹¹¹:

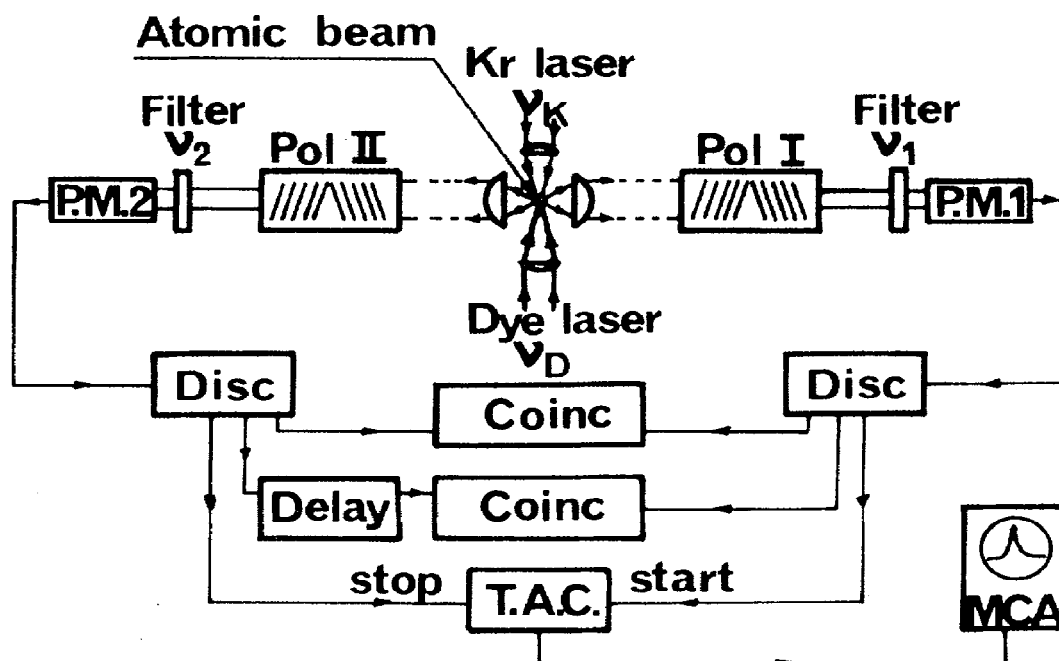


Fig 24: Esquema do experimento realizado por Aspect, Grangier e Roger em 1981.

A amostra utilizada na excitação foi do cálcio ^{40}Ca . Para a emissão do feixe atômico de cálcio, a nossa conjectura é que foi usado um forno similar ao do experimento realizado por Freedman e Clauser (1972), isto porque a cascata utilizada foi a mesma para ambos os experimentos.

Laser de criptônio (Kr) é um laser a gás que contém hélio, porque este material tem um estado metaestável que a 10eV ioniza o criptônio com facilidade, transferindo sua energia para este. Um laser contínuo tem intensidade constante, permitindo obter-se um funcionamento (emissão) de modo único (emite a uma única frequência). Variando sua potência de emissão controla-se a taxa de emissão de fótons. O laser de criptônio não é tão sintonizável quanto o corante, por isso usa-se outro laser, o qual

¹¹¹ In: Aspect, Grangier and Roger, 1981, pp 461.

explicaremos no próximo parágrafo, para realizar a excitação (um estudo sobre a história do laser já foi anteriormente realizado no tópico 3.3).

O laser de rodamine (Dye), que é um corante, é análogo ao laser anterior em termo de controle de frequência (modo único). Agindo na frequência de emissão do laser de corante, é possível ajustar a soma das energias dos dois fótons (emitidos dos dois lasers) de maneira a se sintonizar com o nível superior da cascata com muita precisão, otimizando assim a produção dos pares de fótons correlacionados.

Lentes anaesféricas (já explicada anteriormente no tópico 3.1) são usadas para reduzir as aberrações esféricas (também brevemente explicada no tópico 3.1) proporcionadas por uma lente esférica. No experimento em questão, estas lentes tinham um foco de 40mm e um diâmetro de 50mm. Sua função era coletar a luz fluorescente vinda da fonte. Eram seguidas por um conjunto de lentes que proporcionavam a colimação de luz. Todos os elementos ópticos possuíam um revestimento anti-reflexivo. Foram usadas outras lentes no experimento em questão, porém não foram citadas no artigo que descreve este experimento.

Em frente aos filtros de interferência (já explicada anteriormente no tópico 3.1), foram colocados filtros de vidro colorido, os quais absorviam fótons com comprimento de onda errado, evitando a reflexão desses fótons no caminho de ida para a fonte e para o outro canal.

Os polarizadores foram do tipo placas empilhadas (já explicado anteriormente no item 3.1), os quais foram dez placas finas de vidro inclinadas próximas ao ângulo de Brewster.

No experimento em questão, não foi necessário o resfriamento dos fototubos (estes aparatos já foram explicados anteriormente no item 3.1), já que o ruído de fundo era bastante reduzido.

O circuito de coincidência (já explicado no tópico 3.1) foi semelhante ao usado por Freedman e Clauser (1972).

Laço de realimentação (Phase-Lock-Loop) é um sistema de controle (circuito eletrônico) que gera um sinal relacionado com a fase e a frequência do sinal de referência (sinal de entrada), aumentando ou diminuindo automaticamente a frequência e/ou a fase desse sinal gerado e emparelhando-o com o sinal de referência. Garantia a eficiência do experimento para a fluorescência máxima.

Os discriminadores e o conversor tempo amplitude (T.A.C) já foram explicados anteriormente no tópico 3.1.

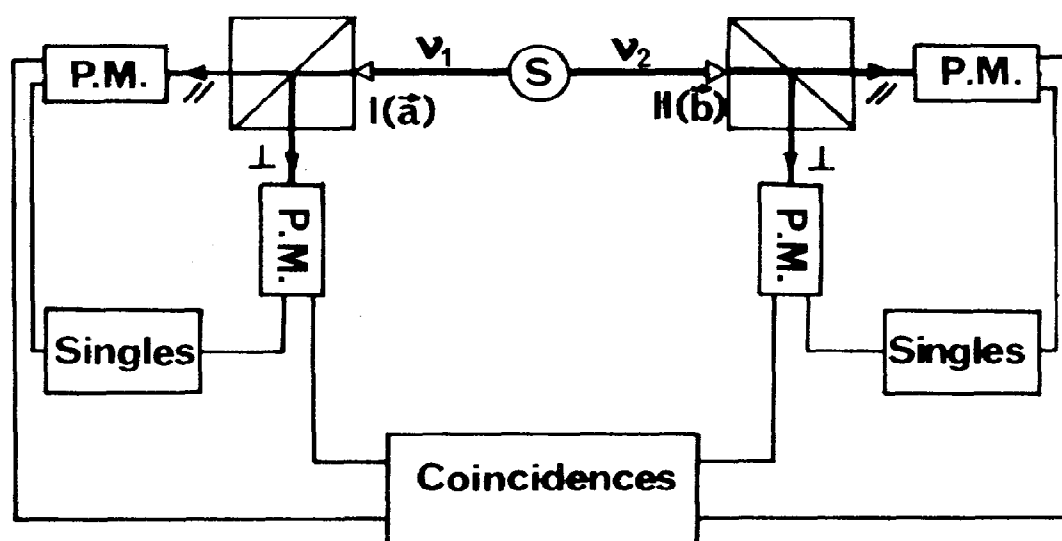
O analisador multicanal (Multi Channel Analyzer) é um dispositivo de armazenamento do numero de eventos em função de um parâmetro experimental (no experimento em questão, os picos de tensão oriundos dos tubos fotomultiplicadores), de tal maneira que, associado a um conversor tempo-amplitude (uma tensão proporcional ao retardo), este analisador multicanal vai lhe restituir uma curva de contagens em função do retardo. O analisador multicanal (MCA) é, sobretudo, um dispositivo de armazenamento prático que existia antes do computador pessoal (ou de pequeno porte, do tipo PDP10) ser introduzido nos laboratórios, que permitia armazenar as contagens em um suporte digital (geralmente magnético). Este dispositivo proporcionava muitas vantagens: automatizar a aquisição de dado, poder fazer cálculos posteriores sobre os dados coletados, etc. Esse analisador podia ser utilizado de várias maneiras (dependendo do fabricante e do modelo), como por exemplo, com um, dois, três ou quatro canais independentes, armazenando dados em função da energia, do um tempo, de um campo magnético, de um campo elétrico, de uma tensão no geral, etc. Por sinal, hoje, não se usa mais analisadores multi-canais, porque eles foram substituídos, aos poucos, por computadores de aquisição.

Bem como na análise da CM feita no experimento realizado por Fry e Thompson, o laser sintonizável só foi desenvolvido em 1965, logo podemos afirmar que os aparatos que compõem o experimento em questão só estavam disponíveis a partir desta data. Em relação à análise das técnicas, a de detecção já estava disponível em 1930 e a de contagem de coincidência a

partir do final da década de 1940, conforme já discutido nos tópicos anteriores. Contudo, o avanço deste experimento ocorreu na técnica de excitação. Esta técnica foi muito mais eficiente que a do experimento realizado por Fry e Thompson (conforme já discutido no tópico 2.4), sendo que os dois passos da excitação foram realizados com lasers, já no experimento realizado por Fry e Thompson só o segundo passo utilizou o laser, o primeiro foi realizado com um canhão solenoidal de elétrons. Notemos que a introdução do laser nos dois passos da excitação causou um aperfeiçoamento bastante significativo na técnica de excitação. Assim, análogo ao raciocínio feito na análise das técnicas do tópico anterior (3.3), a introdução de um aparato causou um aperfeiçoamento numa técnica. Para as técnicas de detecção e contagem, seguem os mesmos raciocínios feitos no experimento realizado por Fry e Thompson.

3.5 Componentes da Cultura Material do segundo experimento realizado por Aspect, Grangier e Roger (1982).

Abaixo vemos o esquema experimental apresentado por Aspect, Grangier e Roger no artigo que descreve o referido experimento¹¹²:



¹¹² In: Aspect, Grangier and Roger, 1982, pp. 92.

Fig 25: Esquema experimental apresentado por Aspect, Grangier e Roger no artigo que descreve o experimento em questão. A fonte é representada por “S”, γ_1 e γ_2 são os fótons correlacionados, PM os fototubos.

A fonte foi a mesma usada no experimento anteriormente realizado pelos autores do experimento em questão (chamamos de fonte o conjunto de todos os aparatos envolvidos na emissão dos fótons correlacionados, i.e, o forno, a amostra de cálcio que foi excitada, os lasers, as lentes, etc).

Polarizadores de cubo são dois prismas com filmes dielétricos finos colados nas faces que fazem as diagonais. As faces de entrada e de saída são anti-reflexíveis. Provavelmente estes prismas são do tipo Glan, os quais separam com grande eficiência as duas polarizações. O feixe incidente no prisma pode ser transmitido, caso a polarização for perpendicular ao plano diagonal do prisma, ou refletido a 90° se for paralelo ao plano diagonal. Apesar de serem mais caros, estes prismas ficaram viáveis para os experimentos que utilizam lasers na técnica de excitação, pois a compactação destes experimentos permitiu uma redução no tamanho da óptica, além de testar as duas polarizações nos eixos paralelos e perpendicular, que (como foi discutida no tópico 2.5) foi o ponto principal do avanço na técnica de detecção, para o experimento em questão. Este tipo de prisma foi desenvolvido por William Hyde Wollaston (1766-1828), médico e químico britânico que ficou famoso por descobrir dois elementos químicos e por desenvolver uma maneira de processar o minério de platina, além de ter sido membro da “Royal Society” ¹¹³.

¹¹³ In: http://pt.wikipedia.org/wiki/William_Hyde_Wollaston, Wikipédia Português, em 09/05/2009.

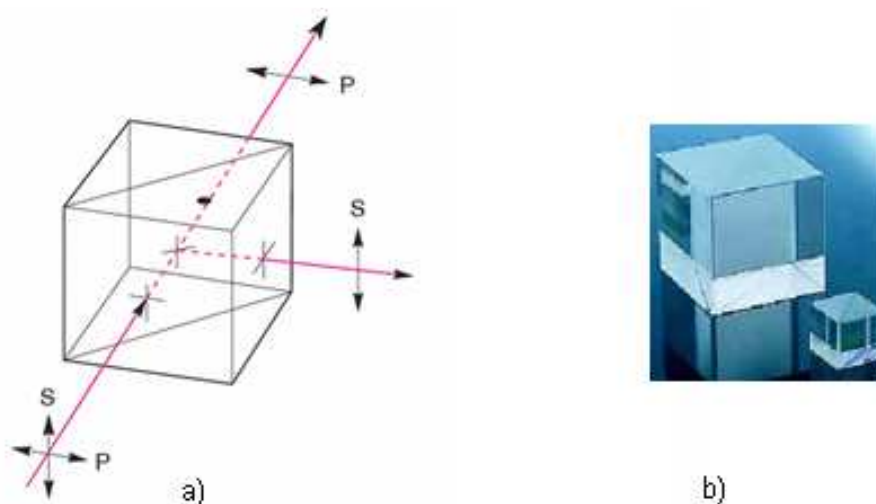


Fig 26: Polarizadores de Cubo. a) Esquema de funcionamento dos polarizadores de cubo. A luz não polarizada incidente é refletida polarizada na direção “s” e transmitida na direção “p”. b) Fotografia de dois polarizadores de cubo. In: http://material-handling.globalspec.com/LearnMore/Optics_Optical_Components/Optical_Components/Polarizing_Cube_BeamSplitters, GLOBAL SPEC (EUA) acessado em 12/01/2009.

Os filtros, as lentes e os fototubos foram os mesmos (do mesmo tipo) utilizados no experimento anteriormente realizado pelos autores, já que eles utilizaram a mesma cascata e assim, conseqüentemente, os fótons correlacionados possuíam o mesmo comprimento de onda.

Também foi utilizado um laço de realimentação (Phase-Lock-Loop) para garantir a eficiência do experimento para a fluorescência máxima (já explicado no tópico anterior).

Os “singles” – que significa canal de detecção único – eram aparelhos que faziam a contagem de todos os fótons únicos detectados em cada um dos fototubos.

O “scaler”, que significa escala de contagem, armazena a quantidade de eventos válidos.

Quanto ao analisador multicanal, já foi explicado no tópico anterior.

O Circuito de Coincidência, o Conversor Tempo Amplitude (T.A.C) e o Analisador Multicanal (MCA) foram os mesmos utilizados nos experimentos anteriores (já explicados no tópico 3.1).

A análise da CM dos instrumentos e a análise das técnicas seguem o mesmo raciocínio realizado no tópico anterior (3.4), exceto para a técnica de detecção que teve uma mudança bastante significativa, a saber, a utilização de quatro canais de detecção ao invés de dois. Esta mudança foi causada pela introdução dos polarizadores de cubos, o que permitiu a detecção das polarizações paralelas e perpendiculares, já que até então estas detecções não foram realizadas nos experimentos anteriormente analisados (conforme já discutido no tópico 2.5). Notemos que, mais uma vez, a introdução de um aparato causou uma mudança bastante significativa no experimento. Vale ressaltar que esta mudança tornou o experimento uma transposição bastante aproximada do experimento de pensamento de Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm, assim denominado por Aspect, Grangier e Roger no artigo que descreve o experimento em questão.

3.6 Componentes da Cultura Material do experimento realizado por Aspect, Dalibard e Roger (1982).

Abaixo temos o esquema experimental apresentado por Aspect, Grangier e Dalibard no artigo que descreve o experimento¹¹⁴:

¹¹⁴ In: Aspect, Grangier and Dalibard, 1982, pp. 1805.

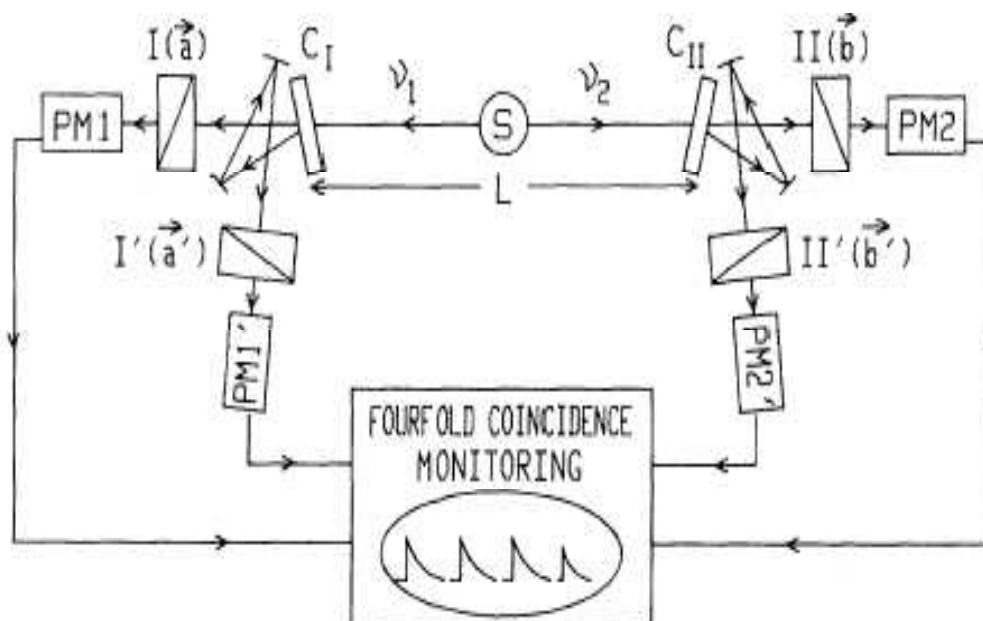


Fig 27: Esquema experimental apresentado por Aspect, Grangier e Dalibard no artigo que descreve o referido experimento. A fonte é representada por “S”, ν_1 e ν_2 são os fótons correlacionados, C_I e C_{II} são os interruptores, “L” é a distância de um interruptor a outro, os polarizadores são representados por $I(a)$ $I'(a')$ $II(b)$ e $II(b')$, PM1 e PM2 representam os fototubos.

Os autores declaram, no artigo que descreve o referido experimento, que a fonte (chamamos de fonte todos os aparatos – lasers, lentes, filtros – envolvidos na excitação da amostra de cálcio e emissão do par de fótons correlacionados) foi a mesma usada nos dois experimentos anteriormente analisados nos tópicos 3.4 e 3.5 desta dissertação. Contudo, eles não puderam manter uma eficiência na coleta de fótons tão boa quanto às dos dois experimentos anteriores¹¹⁵, já que tiveram que reduzir a divergência no feixe para conseguir um bom funcionamento dos interruptores (conforme já comentado no tópico 2.6).

Os interruptores ópticos (optical switches) são dispositivos acústico-ópticos que funcionam como uma rede de difração no ângulo de Bragg. Nestes dispositivos a luz interagia com uma onda estacionária na água, sendo transmitida quando a amplitude da onda era nula e defletida quando esta amplitude era máxima. Esses interruptores mudavam a luz rapidamente de um

¹¹⁵ Aspect, Grangier and Roger 1981 e Aspect, Grangier and Roger 1982.

polarizador para outro num intervalo de tempo de 10 ns ¹¹⁶. Esta mudança não era totalmente aleatória, mas de forma quase periódica. Num experimento ideal essas mudanças deveriam ser totalmente aleatórias. Este dispositivo permitiu que as configurações experimentais mudassem enquanto os fótons estivessem em voo (conforme já discutido no tópico 2.6 desta dissertação). Os primeiros dispositivos switches foram criados com o desenvolvimento da lógica digital, por volta de 1950¹¹⁷, contudo só posteriormente foi utilizada para desviar feixes de laser.

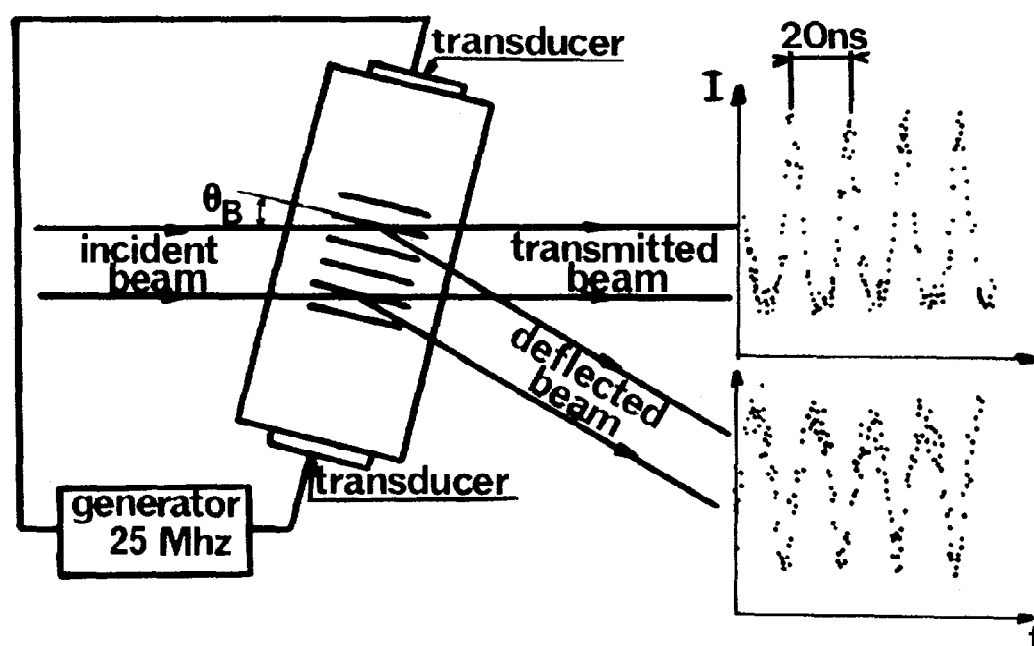


Fig 28: Interruptores (switch) transmitem os fótons de um polarizador para outro. Os transdutores (transducer) produzem as ondas estacionárias na água. O gerador (generator) alimenta os atuadores (transducers) que geram, por sua vez, a onda acústica modulando o índice de refração na água. Os feixes incidem próximo ao ângulo de Bragg (θ_B). In: Aspect, Dalibard e Roger, 1982, pp. 1806.

Os filtros, as lentes e os fototubos foram os mesmos utilizados nos dois experimentos anteriormente realizados por Aspect, Grangier e Roger 1981 e 1982 (já explicados anteriormente no tópico 3.4 e 3.5).

¹¹⁶ Aspect, Dalibard e Roger, 1982, pp. 1804.

¹¹⁷ In: <http://en.wikipedia.org/wiki/Switch>, Wikipédia english, em 06/03/2009.

Os polarizadores também foram do tipo “polarizadores de cubo”, os mesmos utilizados por Aspect, Grangier e Roger 1982 no experimento analisado no tópico anterior (já explicados no tópico 3.5).

Para realizar a contagem de coincidência dos fótons correlacionados, foram usados os mesmos aparatos, bem como a mesma técnica (conforme já discutido no tópico 2.6), que os utilizados no experimento realizado por Aspect, Grangier e Roger 1982, ou seja, o circuito de coincidência, o laço de realimentação (phase-lock-loop), o conversor tempo-amplitude e o analisador multicanal (já explicados no tópico anterior).

A análise da CM dos instrumentos segue o mesmo raciocínio feito no item anterior. Contudo, a mudança em relação aos experimentos anteriormente analisados é na técnica de detecção, já que foi possível redirecionar os fótons de um polarizador para outro. Isto permitiu que as configurações experimentais mudassem enquanto os fótons ainda estivessem em vôo. Mais uma vez notemos que este aperfeiçoamento foi possível devido à introdução de um aparato, os interruptores.

Depois de feita a análise dos instrumentos, apresentaremos agora uma tabela na qual comparamos as técnicas e os desenvolvimentos de um experimento para outro.

Experimento	Excitação	Detecção	Coincidência
Freedman e Clauser (1972)	O cálcio foi excitado por absorção ressonante de uma lâmpada de arco de deutério. Apenas 7% dos decaimentos geravam os pares correlacionados, tirando os átomos que decaíam diretamente para o estado fundamental.	Os fótons correlacionados passavam por filtros, lentes e polarizadores antes de serem detectados por dois fototubos, um em cada canal de detecção.	Foram utilizados dois canais de coincidência, o primeiro fazia a contagem de todas as coincidências e o segundo das coincidências acidentais. As coincidências totais eram subtraídas pelas coincidências acidentais, obtendo-se assim as coincidências reais.
Clauser (1976)	O Hg foi excitado por bombardeamento de elétrons.	Técnica similar a usada no experimento realizado por Freedman e Clauser.	Não ocorreram mudanças significativas, comparando com o experimento realizado por Freedman e Clauser.
Fry e	A excitação do Hg ocorreu	Técnica similar a	Não ocorreram mudanças

Thompson (1976)	em dois passos, um por bombardeamento de elétrons e o segundo por absorção ressonante de um laser.	usada nos dois experimentos anteriormente analisados.	significativas, comparando com os experimentos realizados anteriormente.
Aspect, Grangier e Roger (1981)	A excitação foi feita por dois lasers, a qual foi mais de dez vezes maior que a do experimento realizado por Fry e Thompson e só ocorriam decaimentos dos pares correlacionados.	Técnica similar a usada nos experimentos anteriores.	Não ocorreram mudanças significativas, comparando com os experimentos realizados anteriormente.
Aspect, Grangier e Roger (1982)	Não ocorreram mudanças significativas, comparando com o experimento realizado por Aspect, Grangier e Roger 1981.	Nesta técnica eles utilizaram quatro canais de detecção o que permitiu detectar as polarizações paralelas e perpendiculares dos fótons.	Com o aumento para quatro canais de detecção, a técnica de contagem precisou ser modificada. Para se fazer a contagem de quatro canais teve de se utilizar uma técnica de coincidência "fourfold", ou seja, mede-se a coincidência em quatro canais de detecção.
Aspect, Grangier e Dalibard (1982)	Não ocorreram mudanças significativas, comparando com o experimento realizado por Aspect, Grangier e Roger 1981 e 1982.	Os fótons eram redirecionados de um polarizador para outro, mudando as configurações experimentais durante o voo dos fótons.	Não ocorreram mudanças significativas, comparando com o experimento realizado por Aspect, Grangier e Roger 1982.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As perguntas que nos propusemos a responder na introdução foram: A partir de que data os aparatos necessários para realização dos experimentos estavam disponíveis? Desde quando as técnicas envolvidas foram aperfeiçoadas a ponto de serem utilizadas com precisão nos experimentos em questão ou se estas técnicas consistiam de procedimentos simples?

Conforme já discutido no capítulo 1, uma data que tomamos por base foi à década de 1930, devido ao desenvolvimento do argumento EPR. A análise histórica dos aparatos nos informa que todos os aparatos necessários para a confecção destes experimentos já estavam disponíveis desde 1930, exceto o laser e os quanticons. Contudo, a análise das técnicas nos mostra que: a técnica de excitação, para os dois primeiros experimentos aqui analisados nesta dissertação, já estava disponível a partir da década de 1930, já para os experimentos que utilizaram o laser sintonizável na excitação, esta técnica só poderia ser utilizada a partir de meados da década de 1960, devido ao desenvolvimento deste aparato; a técnica de detecção só estava desenvolvida, a ponto de ser utilizada com precisão nos experimentos aqui analisados, por volta de 1970, devido ao desenvolvimento dos fototubos que faziam contagem de fótons únicos, os quanticons; a técnica de contagem de coincidência só estava desenvolvida a ponto de ser utilizada com precisão nos experimentos a partir da década de 1950, por causa do desenvolvimento do transistor, que permitiu um aperfeiçoamento no circuito de coincidência a ponto de se ter um tempo de resposta na casa dos nanosegundos, já que a janela de coincidência está na casa dos nanosegundos.

Com isso podemos afirmar que, apesar de os aparatos já terem surgidos anteriormente, os experimentos analisados aqui nesta dissertação não poderiam ter sido realizados antes da década de 1970 com a mesma precisão estatística alcançada, já que esta foi um fator determinante para o sucesso dos experimentos.

Vimos também que o desenvolvimento de uma técnica, na maioria das vezes, estava diretamente relacionado ao desenvolvimento ou a criação de um novo dispositivo ou aparato, bem como sua devida utilização (como no

exemplo do laser sintonizável no experimento realizado por Fry e Thompson, os polarizadores de cubo no experimento realizado por Aspect, Grangier e Roger em 1982 e os interruptores (switch) no experimento realizado por Aspect, Dalibard e Roger), confirmando assim que o desenvolvimento da técnica está relacionado com o desenvolvimento do instrumental. Assim, a instrumentação, a experimentação e a teoria caminham cada uma no seu ritmo (Galison, 1999), porém a lógica de uns redefine a dinâmica de outros (Pestre, 1996).

Notemos também que uma figura importantíssima neste recorte histórico é John Clauser. Primeiramente pelo fato de ter sido o primeiro a realizar os testes experimentais com fótons ópticos das desigualdades de Bell, com a ajuda de seu estudante de doutorado Freedman, “na idade da pedra do hardware” (Clauser, in Gilder 2008, pp. 267), sem ter nenhum referencial ou resultado anterior que pudesse norteá-los. Nessas condições a realização experimental torna-se mais difícil porque é uma grande ajuda quando se conhece qual deve ser o resultado experimental que se procura, quando não se sabe realmente se aquele é o resultado correto pensa-se que seu experimento tem algum problema (Freedman in Gilder 2008, pp. 285). Outro ponto importante foi que Clauser ele não utilizou o laser em nenhum dos dois experimentos que realizou, o que fez com que o processo de excitação se tornasse mais trabalhoso, levando estes dois experimentos a serem os mais demorados, conforme já discutido anteriormente no capítulo 2. Além de tudo, o segundo experimento (Clauser 1976) ele realizou sozinho, sendo o único experimento, dentre os seis analisados nesta dissertação, que foi realizado por uma única pessoa.

BIBLIOGRAFIA

Aspect, A., Dalibard, J. and Roger, G. "Experimental Tests of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers". *Physical Review Letters*, v. 49, n 25, 1804-07, (1982).

Aspect, A., Grangier, P. and Roger, G. "Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Inequalities". *Physical Review Letters*, v. 49, n 2, 91-4, (1982).

Aspect, A., Grangier, P. and Roger, G. "Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem". *Physical Review Letters*, v. 47, n 7, 460-463, (1981).

Aspect, A. "Proposed experiment to test the nonseparability of quantum mechanics". *Physical Review Letters*, v. 14, n 8, 1944-51, (1976).

BASSALO, José M. Filardo. "Nascimento da física". Belém: Editora UFPA, 1996.

Bell, J. S. "On the Einstein Podolsky Rosen paradox". *Physics*, 1, 195-200. (1964).

Bell, J. S. "On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics", *Reviews of Modern Physics* 38, 447-52. (1966).

Bispo, W.F.O., "A cultura material da física: uma análise dos primeiros experimentos sobre o teorema de Bell". in relatório final de pesquisa PIBIC, (2006).

Bohm, D. and Aharonov, Y. *Phys. Rev.* 108, 1070 (1957).

Bothe, W. "Coincidence Method". *Science*, V. 122, N. 3175, November 1955.

Bromberg, J. L. "Device Physics vis-a`-vis Fundamental Physics in Cold War America: The Case of Quantum Optics". *Isis*, 97:237-259. (2006).

COHEN, L. & MANIO, N. L. Métodos de investigación educativa. Madrid: Editorial La Muralla, S. A. (1990).

Clauser, J. F. "Experimental Investigation of Polarization Correlation Anomaly", *Physical Review Letters*, 36, 1223-1226, (1976).

_____, "Early History of Bell's Theorem, *Quantum [Un]speakables: From Bell to Quantum Information*", Bertlmann and Zeillinger (orgs); Springer, 2002.

Clauser J. F., Horne M. A., Shimony A., and Holt R. A., "*Proposed Experiment to Test Local Hidden Variable Theories*", *Physical Review Letters* 23, 880-884.

Clauser, J. F., Shimony, A. "*Bell's Theorem: experimental tests and implications*" Rep. Prog. Phys. V. 41, 1978.

Einstein, A., Podolsky, B., and N. Rosen. *Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* *Physical Review*, 47, 777-780, (1935).

Einstein, A., Podolsky, B., and N. Rosen. *Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* (1935) Tradução de Cláudio Weber Abramo, *Caderno de História e Filosofia da Ciência* 2, (1981), pp90-96.

Fick, D. and Kant, H. "Walther Bothe's contributions to the particle-wave dualism of light", preliminary full text of a paper presented at HQ2, Utrecht, July, 2008.

Forman, P., "A cultura de Weimar, a Causalidade e a Teoria Quântica, 1918-1927: A adaptação de físicos e matemáticos alemães a um ambiente intelectual hostil. in *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, UNICAMP, Suplemento 2 (1983), pp 3-98, tradução de Cláudio Weber Abramo.

Freedman, S. J. and Clauser, J. F. (1972) "Experimental Tests of Local Hidden-Variable Theories" *Physical Review Letters* 28 (14):938-41, (1972).

Freire Jr, O. "Philosophy Enters the Optics Laboratory: Bell's Theorem and its First Experimental Tests (1965-1982)" *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 37, pp577-616, (2006), [www.elsevier.com/locate/shpsb].

_____. "Science and exile: David Bohm, the cold war, and a new interpretation of quantum mechanics" *HSPS*, V36, Parte1, (2005).

_____. "David Bohm e a controvérsia dos quanta" Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência – UNICAMP, Campinas, 1999.

_____. "Sobre as desigualdades de Bell" *Caderno Catarinense de Ensino de Física*. Florianópolis, V 8, nº3, pp 212- 226, dezembro 1991.

Fry, E. S. and Thompson, R. I. C. "Experimental Tests of Local Hidden Variable Theories" *Physical Review Letters* 37(8):465-8, (1976).

Galison, P. "Culturas etéreas e culturas materiais", *A ciência tal qual se faz*, Lisboa, 395-414, (1999).

_____. "Image and Logic: the material culture of microphysics". The University of Chicago Press, 1997.

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

Kocher, C. A. and Commins, E. D. "Polarization correlation of photons emitted in an atomic cascade". *Phy. Rev. Let.*, 18(15), 575-7. 1967.

Mulligan, J. F. "Who were Fabry and Pérot?" *Am. J. Phys.*, Vol. 66, No. 9, September 1998, pp.797-802.

Nogueira, Sandra. "A Tanoaria no Concelho do Cartaxo" in *Programa Nacional de Bolsas de Investigação para Jovens Historiadores e Antropólogos*, volume III, 3ª Edição, Lisboa/Porto, Edição da Fundação da

Juventude, 1996/97, 184-293, (2000).

(http://www.naya.org.ar/congreso2002/ponencias/sandra_nogueira.htm).

Pessoa Jr, O. "Conceitos de Física Quântica. V 1, 1ª Ed. – São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.

Pessoa Jr, O. "Conceitos de Física Quântica. V 2, 1ª Ed. – São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.

Pesez, J-M. " História da Cultura Material", *A História Nova*, Jacques Le Goff (ed), São Paulo: Martins Fontes, 237-85, 2005.

Pestre, D. " Por uma Nova História Social e Cultural das Ciências: Novas Definições, Novos Objetos, Novas Abordagens", IG/UNICAMP, V. 06, N. 01, pp 3-57, 1996.

Photomultiplier tubes, basics and applications, second edition (Manual da Hamatsu) Hamamatsu Photonics, Hamamatsu City, Japan, (1999).

Pimentel, A. " *O método da análise documental: seu uso numa pesquisa historiográfica.*" Cadernos de pesquisa nº114, p179-195, Novembro/2001 .

Ribeiro Filho, A. capítulo V "Os quanta e a física moderna", in *Origens e Evolução das Idéias da Física* / Jose Fernando de Moura Rocha (Org). – Salvador: EDUFBA, 2002.

Rosen N., "Some reflections on the EPR work", in A. Mann, & M. Revzen (eds.), *The dilemma of Einstein, Podolsky and Rosen - 60 years later. An international symposium in honour of Nathan Rosen (Haifa, Israel, 1995)*, *Ann. Phys. Soc. Israel* 12, 23-26 (1996).

Saint-Georges, Pierre de. Pesquisa e crítica das fontes de documentação nos domínios económicos, social e político. In: ALBARELLO, Luc et al. *Práticas e Métodos de Investigação em Ciências Sociais*. Lisboa: Gradiva Publicações Ltda., p. 15-47, 1997.