

# O Experimento da Dupla Fenda Como Exemplo de Incognoscibilidade?

(The double-slit experiment as an example of incognoscibility?)

Jenner Barretto Bastos Filho e Antonio Fernandes Siqueira\*

*Departamento de Física, Universidade Federal de Alagoas*

*Campus da Cidade Universitária, 57072-970, Maceió, AL, Brasil*

Recebido para publicação em 2 de Junho de 1992; Revisado pelos autores em 16.09.92, 13.01.93 e 30.04.93  
Aceito em 06 de Setembro de 1993

## Resumo

Neste artigo, apresentamos uma refutação da posição que considera o experimento da dupla fenda como exemplo de incognoscibilidade. Passamos em revista três adoções: a de um realismo não dualista do tipo corpuscular, a do não realismo dualista baseado na exclusão mútua constituído pelo Princípio da Complementaridade (Escola de Copenhagen), e a do realismo dualista objetivo que segue a trilha de Einstein e de Broglie; o realismo não dualista do tipo ondulatório é citado mas dele não se comenta. A única adoção, entre as três analisadas acima, que permite uma explicação inteiramente racional e cognoscível, isenta de qualquer mistério, é a do realismo dualista objetivo. Em termos educativos acreditamos que o pluralismo é melhor que a unilateralidade.

## Abstract

In this paper we present a refutation of the position which considers the double-slit experiment as an example of incognoscibility. Three schools of thought are reviewed: a non-dualist realism of corpuscular type, a dualist non-realism based on the mutual exclusion constituted by the Complementary Principle (Copenhagen School), and an objective dualistic realism which follows the trail of Einstein and de Broglie; the non-dualistic realism of wave type is mentioned but not discussed. The only one which allows an entirely rational and cognoscible explanation, and no mystery at all, is that of objective dualistic realism. From the educational point of view we mean that pluralism is much better than unilaterality.

## I. Introdução

O artigo de Marcelo Affonso Monteiro intitulado "A Evolução da Física e a Sua Relação com o Arcabouço Conceitual do Intelecto Ocidental"<sup>1</sup> procede a uma resenha crítica desde a Mecânica Newtoniana até a Física Contemporânea. Monteiro, no seu resumo, adota explicitamente que a teoria quântica, no corpo do seu artigo, é entendida como a interpretação dos fenômenos quânticos dada pela Escola de Copenhagen(EC).

Comentando o artigo de Monteiro, Fernando Lang

da Silveira<sup>2</sup> observa que Monteiro procede de forma muito restritiva; da Silveira escreve<sup>2</sup>

"Da forma como o artigo<sup>1</sup> se desenvolve parece que a interpretação subjetivista da EC é uma decorrência da Mecânica Quântica (MQ)..... A verdade histórica é totalmente diferente."

Algo muito grave acontece quando Monteiro<sup>3</sup>, se referindo ao experimento da dupla fenda, escreve:

"Este é o terreno da total incognoscibilidade: não existe nenhum meio de se saber o que realmente acontece."

Tal posição filosófica agnóstica é de fato adotada pela Escola de Copenhagen-Göttingen; deste modo

\*Endereço permanente: Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará, Campus do PICI, Cx. Postal 6030, 60455-760, Fortaleza, CE, Brasil

Monteiro está coerente com a posição adotada em seu resumo. No entanto, cresce (e não diminui, como às vezes se quer passar) a oposição à EC. A documentação bibliográfica é bastante significativa desse crescimento. No que diz respeito à Crítica à EC, vozes muito importantes são Bohm<sup>4</sup>, Bunge<sup>5</sup>, Margenau<sup>6</sup>, Landé<sup>7</sup>, Selleri<sup>8</sup>, Vigier<sup>9</sup> e Bell<sup>10</sup>.

Entre outras razões, há pelo menos duas importantes para escrevermos o presente artigo: necessidade de atualização e de pluralismo de concepções.

Queremos, muito enfaticamente, discordar de que o experimento da dupla fenda seja um exemplo de incognoscibilidade. Esse ponto é de crucial importância e deve ser discutido no seio da comunidade.

## II. O experimento da dupla fenda

O experimento da dupla fenda<sup>11</sup> consiste no seguinte: Um feixe de elétrons monoenergéticos (por exemplo) passa por um primeiro anteparo onde existem duas fendas. A uma distância macroscópica do primeiro anteparo há um segundo anteparo sem furos e paralelo ao primeiro; ao longo desse segundo anteparo desloca-se um contador de elétrons (contador Geiger) paralelamente a linha que liga as duas fendas; a fim de que se proceda a contagem do número de elétrons que chega em cada posição deve-se deixar o contador durante um mesmo tempo prefixado.

Deixando-se a fenda A aberta e obstruindo-se a fenda B, obtém-se uma tendo em vista o número de elétrons contados em cada posição  $x$  do segundo anteparo, uma curva de probabilidade  $P_A(x) = P_A$ . De maneira análoga, deixando-se a fenda B aberta com a fenda A obstruída, obtém-se uma curva de probabilidade  $P_B(x) = P_B$ .

Deixando-se ambas as fendas abertas, obtém-se uma curva de probabilidade  $P_{(AB)}(x) = P_{(AB)}$  que não é igual à soma das duas anteriores. Assim obtém-se

$$P_{(AB)} \neq P_A + P_B \quad (1)$$

O resultado (1) é considerado amplamente na literatura com os adjetivos de estranho, de misterioso e até de incognoscível. A razão dessa suposta incognoscibilidade é centrada no seguinte: os elétrons saem da fonte e chegam ao anteparo em pequenos torrões ("lumps"). Pode-se inclusive consubstanciar essa afirmativa propondo experimentos que deixarão claro que as entidades

que saem da fonte e chegam ao segundo anteparo são localizadas tendo massa, carga e spin correspondentes a aqueles do elétron. Se supusermos a individualidade dos elétrons, cada um deles deve passar ou através de uma fenda ou através de outra. Deste modo, o resultado razoável seria  $P_{(AB)} = P_A + P_B$  e não o resultado (1).

Em outras palavras, (1) poderá significar qualquer coisa como cada elétron passar parcialmente pela fenda A e parcialmente pela fenda B. Alguém perguntaria como isso poderia ter lugar se os elétrons são entidades localizadas e as fendas são separadas por uma distância que, evidentemente constitui uma entidade extensa.

A seguir, abordaremos o resultado obtido à luz de três Escolas de Pensamento.

### i) Realismo não dualista corpuscular

Conforme essa Escola, os elétrons são objetos quânticos realmente existentes e independentes de nós (pressuposto realista); são, outrossim, partículas pontuais à la Newton. Esta adoção parte do pressuposto, corroborado pela experiência, segundo o qual os elétrons tanto partem da fonte quanto chegam ao segundo anteparo aos torrões ("lumps") e assim não haveria uma boa razão para, no meio do caminho, se "travestirem" de "onda" ou de qualquer outra coisa.

De acordo com tal concepção<sup>2</sup>, as possibilidades são:  $A_e$ : o elétron passa pela fenda A e é detectado no segundo anteparo

$B_e$ : o elétron passa pela fenda B e é detectado no segundo anteparo

Neste contexto, os eventos que podem ter lugar são aqueles do tipo  $(A_e \vee B_e)$ , nunca tendo lugar eventos do tipo  $(A_e \wedge B_e)$ . Aqui, o símbolo  $\vee$  denota ou e o símbolo  $\wedge$  denota e. De acordo com o realismo não dualista corpuscular,  $(A_e \vee B_e)$  significa que cada elétron ou passa pela fenda A ou passa pela fenda B; por outro lado, o evento  $(A_e \wedge B_e)$  não pode ter lugar posto que o elétron, sendo uma entidade pontual, não poderá passar simultaneamente por duas fendas espacialmente separadas, e por esse fato, constituindo uma entidade extensa.

A probabilidade de um elétron ser detectado no segundo anteparo será

$$P(X_e) = P[X_e \wedge (A_e \vee B_e)] \quad (2)$$

que representa a probabilidade de chegada do elétron em  $X_e$  passando pela fenda A ou pela fenda B. Admitindo-se as leis probabilísticas e lógicas ordinárias, podemos escrever:

$$P(X_e) = P[(X_e \wedge A_e) \vee (X_e \wedge B_e)] \quad (3)$$

Neste contexto, podemos escrever,

$$P(X_e) = P[X_e \wedge A_e] + P[X_e \wedge B_e] \quad (4)$$

O resultado (1) (empírico) está em contradição com o resultado (4); escrevendo o resultado (1) na notação usada imediatamente acima, teremos,

$$P(X_e) \neq P[X_e \wedge A_e] + P[X_e \wedge B_e] \quad (5)$$

Para que o realismo não dualista corpuscular possa explicar a contradição entre o resultado empírico (5) e o teórico (4) deve-se investigar quais os pressupostos teóricos de (4). Efetivamente, ou as leis probabilísticas ordinárias usadas em (2) e na passagem de (3) para (4) não valem; ou as leis lógicas ordinárias usadas para passar de (2) para (3) não valem; ou ainda a individualidade lógica do elétron, como as definições de  $A_e$  e  $B_e$  e a recusa em aceitar eventos do tipo  $(A_e \wedge B_e)$  não valem.

Faz parte deste realismo, manter as leis probabilísticas ordinárias e a individualidade lógica do elétron. Deste modo, a contradição entre (4) e (5) residiria no fato do resultado (4) ser obtido através do uso da propriedade distributiva da lógica ordinária. Assim, segundo um tal ponto de vista, a lógica quântica, diferentemente da clássica, seria intrinsecamente não distributiva.

A adoção de uma lógica não distributiva não é isenta de graves dificuldades; além de não contribuir para a compreensibilidade (cognoscibilidade) do experimento posto que remete o problema para uma obscura lógica não distributiva, não explicaria convincentemente a segunda parte do experimento; essa segunda parte consiste justamente na colocação de instrumentos (contadores) na região próxima às fendas, o que acarreta na destruição da interferência e, como consequência, o resultado empírico seria um do tipo (4) ao invés de (5); a medida através de instrumentos próximos às fendas (primeiro anteparo) teria como efeito transformar uma

lógica não distributiva em uma lógica distributiva; seria uma coisa, no mínimo, muito surpreendente.

## ii) Realismo não dualista ondulatório

Os elétrons, objetos reais, são supostos entidades ondulatórias; revelar-se iam como partículas. Não entraremos em detalhes sobre uma tal adoção<sup>13</sup>

## iii) Dualismo não realista baseado na exclusão mútua

Quando no primeiro anteparo a fenda B está obstruída e a fenda A está aberta, obtém-se no segundo anteparo uma distribuição de probabilidades para a chegada dos elétrons em função de  $x$

$$P_A(x) = |\phi_A|^2 \quad (6)$$

onde  $\phi_A$  é uma função, em geral complexa, chamada de amplitude de probabilidade.

De maneira análoga, deixando-se a fenda B aberta e obstruindo-se a fenda A, obtém-se

$$P_B(x) = |\phi_B|^2 \quad (7)$$

onde  $\phi_B$  é a amplitude de probabilidade correspondente.

Deixando-se ambas as fendas abertas, obtém-se o resultado

$$P_{AB}(x) = |\phi_A + \phi_B|^2 \quad (8)$$

o que mostra que  $P_{AB}(x)$  não é a mera soma de  $P_A(x)$  com  $P_B(x)$  (fórmula (1)) pois há o termo de interferência de amplitudes.

Até aqui, trata-se de um resultado independente de interpretação particular. Passemos então a analisar a solução da Escola de Copenhagen.

A EC usa, no seu universo de discurso<sup>14,15</sup> tanto a imagem-conceito corpuscular quanto a imagem-conceito ondulatória; segundo se argumenta, vivemos em um mundo clássico e são essas as imagens que nós, como seres macroscópicos, podemos compreender; além disso, essas imagens conceituais devem ser preservadas a fim de que possamos fazer a correspondência entre os mundos, clássico e quântico.

Outrossim, qualquer afirmação sobre o sistema estudado, deve se referir ao aparato de medida utilizado;

a EC interpreta o quantum mínimo de ação como significando a impossibilidade de separar nitidamente o objeto quântico do instrumento de medida; como, segundo a EC, a afirmação fatural sobre o objeto quântico depende da medida haveria portanto um elemento incontrolável; deste modo, considera-se como "non sense" qualquer afirmativa sobre o sistema estudado independentemente de referência ao instrumento que o meça. Esta adoção filosófica nega que haja sentido se falar sobre a realidade ontológica dos objetos quânticos quando sobre eles não se efetua uma medida.

A adoção das imagens-conceitos clássicas (onda partícula) no universo de discurso da EC passa por rigorosa tradução através do Princípio da Complementaridade que argui pela sua exclusão mútua, isto é, experimentos revelando o aspecto ondulatório excluem o aspecto corpuscular enquanto os experimentos revelando o aspecto corpuscular, excluem o aspecto ondulatório.

No que diz respeito ao experimento em consideração, quando as duas fendas estão abertas, obtém-se uma distribuição de probabilidade de chegada dos elétrons que tem a forma matemática de uma interferência de ondas (fórmula 8); há uma interferência de amplitudes (quânticas) de probabilidade. Segundo a EC, essa onda não constitui uma tal realmente existente, como as ondas de matéria e as ondas eletromagnéticas, e sim *uma onda matemática cujo módulo ao quadrado fornece a distribuição de probabilidade relativa à chegada dos elétrons no segundo anteparo.*

Segundo a EC, quando ambas as fendas estão abertas e a medida de distribuição de probabilidades relativa à chegada dos elétrons no segundo do anteparo revela um aspecto ondulatório, a afirmação de que um dado elétron ou passa pela fenda A ou passa pela fenda B é destituída de sentido. Quando, por outro lado, instrumentos medidores são colocados próximos às fendas A e B, a figura de interferência é destruída e advém o aspecto corpuscular; assim, uma relação como a do tipo (4) passa a ter lugar.

De acordo com a EC, é o ato de medida que cria a realidade de um dado elétron passar por uma ou por outra fenda; se não se fizer a medida através de instrumentos próximos às fendas tudo se passa como se cada elétron atravessasse parcialmente pela fenda A e parcialmente pela B. Como isso é incompreensível do ponto de vista da individualidade dos entes pontuais poder-

se-ia atribuir tal coisa a uma insuficiência teórica, tendo em vista que, independentemente da medida, o elétron ou passa por A ou passa por B. No entanto, a EC *não pode* admitir isso pois tal coisa implicaria em completar uma teoria já considerada completa.

Há uma outra maneira de se interpretar essa exclusão mútua que constitui o Princípio da Complementaridade: uma descrição espaço-temporal exclui a descrição causal e vice-versa; elas são, segundo a EC, mutuamente excludentes, porém complementares.

A EC e seu Princípio da Complementaridade inscrevem-se em atitudes filosóficas agnósticas e pessimistas como "o máximo que podemos fazer é "compreender" o incompreensível" (Para a crítica dessa posição de Bohr ver Popper<sup>16</sup>). Tendo em vista tal adoção, o experimento da dupla fenda é de fato pertencente ao terreno da incognoscibilidade.

#### iv) Realismo dualista objetivo

O dualismo objetivo segue a trilha deixada por Einstein e de Broglie<sup>17,18</sup>. Ao invés de se falar em um dualismo secundado por uma exclusão mútua de aspectos que por outro lado seriam complementares, o dualismo objetivo adota que os objetos quânticos são realmente existentes, independentemente de atos de medida, e contém, ao mesmo tempo, ambos os aspectos, corpuscular e ondulatório. Assim, os objetos quânticos são compostos de uma partícula localizada e uma onda extensa, ambos, realmente existentes. Essa adoção, permite tornar inteligível e absolutamente compreensível todos os aspectos do experimento da dupla fenda e no contexto de uma lógica distributiva.

Vejamos como isso se dá:

Sejam as seguintes notações:

$$\begin{aligned} A_1 & : \text{ a partícula passa pela fenda A.} \\ B_1 & : \text{ a partícula passa pela fenda B.} \\ A_2 & : \text{ a onda passa pela fenda A.} \\ B_2 & : \text{ a onda passa pela fenda B.} \end{aligned} \quad (9)$$

No contexto de um dualismo objetivo como este, os eventos que podem ter lugar são do tipo

$$A_e = A_1 \wedge (A_2 \wedge B_2) \quad (10)$$

$$B_e = B_1 \wedge (A_2 \wedge B_2) \quad (11)$$

A leitura da fórmula (10) é a seguinte: a partícula passa pela fenda A e a onda passa pelas fendas A e B. Tal leitura é absolutamente realista pois a partícula enquanto ente pontual somente poderá passar por uma das fendas (no caso a fenda A) enquanto a onda, que é um ente extenso pode passar por ambas as fendas; de maneira completamente análoga, a fórmula (11) diz respeito à partícula passando por B e a onda passando por A e B.

Ainda em conformidade com o princípio lógico da individualidade da partícula, os eventos que têm lugar são do tipo  $A_e \vee B_e$  que se lê  $A_e$  ou  $B_e$ ; não poderá ter lugar algum evento  $A_e \wedge B_e$  que se lê  $A_e$  e  $B_e$  pois a partícula, enquanto ente pontual, não pode passar, ao mesmo tempo, por ambas as fendas; isso se dá, *independentemente de que se faça ou não medidas através de instrumentos próximos às fendas*.

A chegada de um elétron no segundo anteparo constitui um fenômeno complexo que tanto diz respeito à chegada de um corpúsculo quanto a de uma onda extensa.

A probabilidade de chegada de um elétron em  $X_e$  no segundo anteparo será

$$P(X_e) = P[X_e \wedge (A_e \vee B_e)] \quad (12)$$

Admitindo a propriedade distributiva,

$$P(X_e) = P[(X_e \wedge A_e) \vee (X_e \wedge B_e)] \quad (13)$$

Donde,

$$P(X_e) = P[(X_e \wedge A_e) + (X_e \wedge B_e)] \quad (14)$$

A interferência entre as ondas  $A_2$  e  $B_2$  comparece em ambos os termos do segundo membro de (14). Deste modo, sem qualquer mistério, a lógica distributiva dá conta da interferência; basta para tal, seguir o dualismo objetivo de Einstein e de Broglie.

Vejam a segunda parte do experimento da dupla fenda onde instrumentos são colocados em regiões próximas às fendas. Os eventos que podem ter lugar são

$$A'_e = A_1 \wedge (A_2 \wedge B'_2) \quad (15)$$

$$B'_e = B_1 \wedge (A'_2 \wedge B_2) \quad (16)$$

$$a'_e = A_1 \wedge (A'_2 \wedge B_2) \quad (15')$$

$$b'_e = B_1 \wedge (A_2 \wedge B'_2) \quad (16')$$

A leitura de (15) é a seguinte: a partícula passa pela fenda A, as ondas passam pelas fendas A e B porém o instrumento absorve a onda que passou por B. A leitura de (16) é análoga: a partícula passa pela fenda B, as ondas passam pelas fendas A e B porém o instrumento absorve a onda que passou por A. Para as leituras de (15') e (16'), o procedimento "mutatis mutandis".

Tendo em vista uma tal absorção, os eventos (15) (16) (15') e (16') podem ser representados por:

$$A''_e = A_1 \wedge A_2 \quad (17)$$

$$B''_e = B_1 \wedge B_2 \quad (18)$$

$$a''_e = A_1 \wedge B_2 \quad (17')$$

$$b''_e = B_1 \wedge A_2 \quad (18')$$

Admitindo a lógica distributiva, a chegada de cada elétron no segundo anteparo terá a seguinte probabilidade:

$$\begin{aligned} P(X_e) &= P[(X_e) \wedge (A'_e \vee B'_e \vee a'_e \vee b'_e)] \\ \therefore P(X_e) &= P[(X_e \wedge A'_e) + P[X_e \wedge B'_e] \\ &\quad + P[X_e \wedge a'_e] + P[X_e \wedge b'_e] \\ \therefore P(X_e) &= P[(X_e \wedge A''_e) + P[X_e \wedge B''_e] \\ &\quad + P[X_e \wedge a''_e] + P[X_e \wedge b''_e]] \quad (19) \end{aligned}$$

Note que em todos os quatro termos do segundo membro de (19) não existe qualquer interferência entre as ondas o que facilmente se verifica a partir de (17), (18), (17') e (18'). Isso explica de maneira inteiramente racional o porque dos instrumentos próximos às fendas destruir a interferência, ao invés do misterioso colapso ou atos de medida criando realidades.

### III. Discussões sobre o dualismo objetivo

É importante dar ênfase aos seguintes pontos:

I) Basta que um instrumento medidor (contador) seja colocado na região próxima a alguma das fendas para que a interferência seja destruída. A outra onda sozinha não poderá dar conta da interferência, pois, como é evidente, o fenômeno da interferência requer pelo menos duas ondas. É importante aqui ressaltar que o fenômeno da interferência tem lugar, mesmo a nível de emissões quânticas singulares (cada objeto quântico

singular) como veremos mais adiante na explicação racional da experiência de Janossy<sup>19</sup>

A eq. (19) diz respeito aos processos possíveis que envolvem a absorção de uma das ondas; perguntar-se-ia então pela possibilidade de processos do tipo  $A_1 \wedge (A_2 \wedge B_2)$  e  $B_1 \wedge (A_2 \wedge B_2)$  que não estão incluídos em (19); tais processos, se possíveis destruiriam a interferência ainda com maior razão. Há, no entanto, uma questão de princípio extremamente importante. Ainda que admitamos a possibilidade dos instrumentos absorverem ambas as ondas, isso não pode ter lugar "in totum". A dualidade é uma propriedade objetiva do objeto quântico em qualquer instante, mesmo nos casos em que a dualidade não seja manifesta, como adiante veremos. Deste modo, ainda que as duas ondas sejam absorvidas, necessariamente alguma parte que constitua uma onda remanescente deverá, de algum modo, acompanhar o corpúsculo. Isso é necessário assumir pois a dualidade é uma propriedade objetiva do objeto quântico em qualquer caso: quando decaem em outros objetos quânticos, quando colidem na faixa de altas energias e se transformam em outros objetos etc. Uma onda pode não estar acompanhada de uma partícula (caso, por exemplo, da onda vazia do experimento Janossy, como veremos adiante), mas um corpúsculo sempre está associado a uma onda.

Poder-se-ia, por outro lado, arguir que há a possibilidade do(s) instrumento(s) não absorver nenhuma das ondas e assim a eq.(19) deveria conter, em adição, processos expressos em (10) e (11) os quais são responsáveis por interferência. Diríamos, no entanto, que essa ocorrência é altamente improvável dado que as dimensões da onda associada são muitas ordens de grandeza maiores que a correspondente à localização da partícula (suposta pontual mas evidentemente ocupando um pequeníssimo volume). A experiência corrobora que um instrumento colocado na região próxima às fendas, destrói a interferência.

**II)** Como um segundo ponto relevante para a nossa discussão, deveremos ressaltar que a interferência é destruída mesmo se o instrumento que absorve a onda não revelar coisa alguma.

Para entender este ponto de crucial importância é necessário lembrar que o objeto quântico (no caso o elétron), além de ser objetivamente dual, tem a sua

energia ou inteiramente ou quase inteiramente, transportada pela partícula<sup>20-23</sup>. Em outras palavras, a onda associada, ou não transporta energia alguma ou a transporta em quantidade muito pequena, a qual, apesar de não ser suficiente para ser detectada pelos instrumentos, revelaria a sua existência real modificando as probabilidades de transição. São as chamadas "empty waves" ou "ghost waves" na notação em inglês "Gespensterfelder" na notação em alemão (em português "ondas vazias" ou "ondas fantasmas" ou ainda "campos fantasmas"). É importante dizer que tais "fantasmas decorrem do senso de ironia fina de Einstein, pensador genial e de grande compromisso com o realismo e com o racionalismo; nada tem a ver com fantasmas nem muito menos com aqueles que recentemente encheram de vergonha os homens de bem de nosso país.

Deste modo, a fim de que a interferência seja destruída, basta que o instrumento absorva a onda ainda que não revele a partícula. Isso ficará melhor entendido se pensarmos na solução realista e racional do paradoxo da dualidade onda-corpúsculo que aparece na comparação dos resultados das experiências óticas de Janossy<sup>19</sup> por um lado, e Dagenais/Mandel<sup>24</sup> por outro. Embora nessas duas experiências combinadas, o objeto quântico seja o fóton ao invés do elétron, os argumentos concernentes à dualidade serão inteiramente equivalentes. Em ambas as experiências, são utilizadas fontes de luz de baixíssima intensidade, capazes de emitir fótons um por um (emissões singulares). Também, em ambas as experiências, cada um desses fótons incidirá sobre um espelho semi-transparente (EST) (tipo pele de leopardo com metade de sua área ocupada por pintas prateadas e outra metade transparente) disposto de tal maneira que a sua normal faça um ângulo de 45° com a linha de incidência dos fótons. A experiência de Janossy faz uso, além disso, de dois espelhos de reflexão total (ERT). O dispositivo todo é conhecido como interferômetro de Michelson. Na experiência de Dagenais/Mandel, os ERT são substituídos por fotomultiplicadoras (F). O interferômetro de Michelson é um dispositivo muito conhecido e uma figura o representando pode ser encontrada em muitos livros entre os quais<sup>25-27</sup>. Remetemos o leitor a alguma dessas figuras.

No caso de Dagenais/Mandel as emissões fotônicas singulares são detectadas ou em uma ou em outra das

F, e assim, são 100% anti-correlacionadas.

No caso de Janossy, depois da reflexão nos ERT há uma recombinação das ondas no EST e se observa, depois de uma superposição de eventos singulares, após um dado tempo de exposição, a figura de interferência, mesmo para baixíssimas intensidades (compatíveis com as emissões fotônicas singulares).

Admitindo o dualismo objetivo, o paradoxo é resolvido muito simplesmente e sem mágica alguma. Vejamos então como isso se dá.

No caso de Dagenais/Mandel, o fóton, ao incidir no EST ou é transmitido ou é refletido, mas a sua onda associada se divide em duas, uma que acompanha o fóton e se dirige para uma das F, e outra vazia que vai na direção da outra F. Essa segunda onda é absorvida mas não detectada pela F correspondente, pelo fato de, ou não transportar energia alguma ou transporta-la em quantidade insuficiente para que se dê a detecção; a outra onda que acompanha o fóton é também absorvida pela F correspondente; o fóton que a acompanha, sendo portador de energia, é detectado. Isso explica a anti-correlação a 100% das coincidências nas duas F. Esta é uma explicação racional; para tal basta que admitamos, que a onda vazia ou não transporta energia alguma ou a transporta em quantidade insuficiente para ser detectada.

A EC dá para isso uma explicação que nada tem de convincente e mais parece varinha de condão; segundo a EC, imediatamente antes da medida, o fóton está simultaneamente nos dois caminhos (que por sinal são macroscópicos); o fóton, ao ser detectado, faz com que a função de onda "colapse instantaneamente" para uma das duas possibilidades.

Voltemos à explicação do dualismo objetivo para a experiência de Janossy. Aí não teremos mais F e sim ERT. Após a divisão no EST, o fóton e sua onda associada que o acompanha são refletidos em um dos ERT, enquanto a onda vazia é refletida no outro ERT. No retorno, dá-se uma recombinação das ondas no EST, recombinação essa que faz guiar o fóton, um a um, para a zona de interferência, revelando assim que a mesma se dá a nível de cada emissão quântica singular (fóton); assim, a figura total de interferência constitui uma superposição de um número muito grande de eventos repetidos a baixíssimas intensidades, compatíveis com a fonte que pinga fótons um a um.

Explicações baseadas no dualismo objetivo dão conta, não apenas das experiências de Janossy e de Dagenais/Mandel; elas explicam também o experimento da dupla fenda, os fenômenos da interferometria de neutrons e muitos outros.

III) Os positivistas, entre eles aqueles da EC, os quais fazem apologia da idéia segundo a qual as medidas "criam" realidades, decerto contrapõem-se às "empty waves" ou "ghost waves". Dizem que são entidades não observáveis e portanto não devem fazer parte das teorias científicas.

No entanto, há diversas circunstâncias a favor das ondas vazias. Por exemplo, na experiência de Janossy, se interpusermos um obstáculo em qualquer região de um dos braços do interferômetro de Michelson que liga um dos ERT ao EST, destruiremos a interferência. Isso mostra que a interferência, mesmo a baixíssimas intensidades, depende de entidades físicas reais (e não de fantasmas) advindas da reflexão em ambos os ERT.

Quem se sente ligado à tradição de racionalidade haverá de convir que a caça às ondas vazias as quais modificam as probabilidades de transição nos sistemas instáveis, constitui um caminho mais fértil que resignação cognitiva da EC baseada em exclusões mútuas, dupla verdade, colapsos instantâneos e anti-causalidade.

A fim de melhor consubstanciar os argumentos pró dualismo objetivo e contra a EC, procederemos um criticismo às conclusões tiradas por um intérprete avançado de Copenhagen (Wheeler) no tocante as suas famosas experiências de pensamento conhecidas como experiências de escolha retardada. Os argumentos de Wheeler podem ser apresentados assim:

Imaginemos que o fóton (singular) que deixou a fonte, já interagiu com o EST. Segundo a EC, podemos fazer escolhas "a posteriori", ou seja, depois da interação do fóton com o EST, e decidir o que queremos, ou o aspecto corpuscular ou o aspecto ondulatório; basta, para tal, que coloquemos ou fotomultiplicadoras (aspecto corpuscular) ou ERT (aspecto ondulatório). Em outras palavras, segundo a EC (versão de Wheeler), podemos decidir no futuro (e exatamente na hora da medida) se o fóton percorreu dois caminhos ou apenas um. Para interferômetros de Michelson de dimensões cosmológicas (experiências de pensamento)

Wheeler considera possível modificar, pelos atos de observação, a história do Universo. Cremos que essa inversão entre Causa e Efeito e o caráter instantâneo do colapso, constituem argumentos contundentes contra a EC e a favor do dualismo objetivo.

Em relação ao experimento da dupla fenda<sup>26</sup>, as experiências de escolha retardada significam, para a EC, pelo menos na versão wheeleriana, que podemos decidir "a posteriori" se o elétron passou por uma ou por ambas as fendas. Qualquer sentimento realista, causalista e racionalista veria isso, pelo menos, com bastante desconfiança.

Com referência a experiência de Janossy, as superposições de ondas para cada emissão quântica singular, são coerentes; se um dos braços do interferômetro for distanciado de tal maneira que seja incompatível com o comprimento de coerência do fóton, a interferência é destruída para fontes de baixíssimas intensidades, independentemente do tempo de exposição; isso reforça a idéia de que essas superposições coerentes que, no curso de um tempo longo de exposição, formam a figura de interferência, são formadas a partir de um número bastante grande de eventos singulares.

Algumas questões importantes ainda devem ser esclarecidas.

(a) A Escola que defende o dualismo objetivo sustenta que os objetos quânticos são, em realidade, duais, isto é, elétrons, fótons, nêutrons, múons, píons, etc., constituem respectivamente, um corpúsculo localizado portador de energia, e uma onda associada.

(b) O fenômeno da interferência exige necessariamente coerência. Segundo o dualismo objetivo, a parte corpuscular do elétron, quando de sua passagem por uma das fendas, terá a sua onda associada dividida em duas respectivamente passando por cada uma das fendas, e, ambas, se estendendo por dimensões macroscópicas.

(c) Quando as ondas são absorvidas pelos instrumentos nas vizinhanças das fendas (preservando sempre a dualidade objetiva) e por conseguinte, nas vizinhanças do 1º anteparo, a coerência é destruída, e, com essa, a interferência entre as ondas. Como não se dá a coerência, o corpúsculo, quando chega no 2º anteparo, comporta-se classicamente a exemplo de bolas de gude e balas de revólver. Neste caso vale a lei  $P_{AB} = P_A + P_B$ .

(d) No caso (c), a dualidade não é manifesta pela

perda de coerência quando a matéria do contador absorve as ondas que se subdividem a partir da onda associada. Cumpre ainda notar que essa absorção, tal como discutimos acima, não pode em nenhum caso se dar "in totum" pois o caráter dual do objeto quântico é sempre preservado.

(e) Basta que uma das ondas seja absorvida para que a interferência e a coerência se desfaçam; isso se dá, independentemente de por qual das duas fendas passe o corpúsculo e por qual dos instrumentos a onda seja absorvida; pode-se pensar, por exemplo, no caso do corpúsculo ter passado pela fenda A e a onda não absorvida ter passado pela fenda B. Como não há coerência, a onda não terá condições de conduzir o corpúsculo para a zona de interferência no 2º anteparo; também aqui não haverá interferência e a distribuição de probabilidades é meramente clássica:  $P_{AB} = P_A + P_B$ .

(f) É a interferência (necessariamente coerente) das ondas quânticas, realmente existentes, que conduz o elétron para a zona de interferência no 2º anteparo. No 2º anteparo, há regiões onde o elétron sempre pode estar, isto é tem probabilidade não nula de presença na onda, e há regiões onde o elétron não pode ser encontrado, isto é tem uma probabilidade sempre nula de presença na onda.

(g) Como a figura de interferência pode ser formada a partir de um número grande de eventos singulares repetidos, isso constitui uma prova luminosa de que a dualidade objetiva é uma propriedade de cada objeto quântico de per si. Se isso não fosse verdade, não haveria razão alguma para cada corpúsculo, de per si, sempre atingir certas regiões e nunca atingir outras.

(h) Nos casos em que a coerência se desfaz, (c) e (e), não há, no 2º anteparo, regiões onde o elétron nunca atinge, salvo, evidentemente, aquelas infinitamente distantes; em outras palavras não há nenhum vale (depressão) na distribuição de probabilidades. Para uma tal distribuição (meramente clássica) é inapropriado se falar de probabilidade de presença na onda. Deste modo, não é verdade que a partícula que passou pela fenda A e a onda não absorvida que passou pela fenda B impliquem que a partícula apenas tenha uma probabilidade não nula de ser detectada na região do 2º anteparo em frente à fenda B. O dualismo objetivo sustenta que os tipos de absorção discutidos acima acarretam na destruição da coerência; essa perda de coerência acarreta

na distribuição meramente clássica das probabilidades de chegada no 2<sup>o</sup> anteparo. Em outras palavras, a onda sozinha que chega no segundo anteparo proveniente da fenda B, não pode revelar a dualidade; a dualidade é tão somente revelada quando duas ondas interferem coerentemente e conduzem o corpúsculo para a zona de interferência. Logo, a onda sozinha que chega no 2<sup>o</sup> anteparo, além de não ser observada, não pode fornecer a probabilidade de chegada do corpúsculo no 2<sup>o</sup> anteparo.

(i) É ainda necessário distinguir, bastante claramente, a absorção das ondas pelos instrumentos colocados na região próximas às fendas (o que não é diretamente observável) da detecção das partículas por esses instrumentos. A absorção das ondas não é detectada enquanto a detecção das partículas (portadoras de energia) tem lugar através de um espalhamento no qual são envolvidas trocas de energia.

#### IV. Conclusões

A aparente ingenuidade do Princípio da Complementaridade proposto pela EC esconde consequências de profundo teor obscurantista. A não compreensibilidade das leis naturais, melhor dizendo, dos processos naturais, pode levar à não discussão dos problemas sociais, educacionais e de comportamento de uma forma geral. Dizer que não se pode compreender o incompreensível, nos parece semelhante a afirmar coisas tais como "pobre é pobre porque é pobre" e que nada pode ser feito porque "o estado de pobreza é determinado pelo destino e não podemos compreender o destino."

Em outra direção, o "incompreensível" da natureza leva a distorções irreparáveis na educação. A não explicação dos "mistérios da natureza", implica na imposição de pensamentos e regras que, quando não produzem efeitos mais danosos, levam ao autoritarismo sem limites. A educação é transformada em um sem número de "operações" onde a criatividade, a crítica e o bom senso são relegados a planos absolutamente inferiores, sempre em nome de não se poder compreender o incompreensível.

Nesta discussão, pelo menos estamos do lado de alguns gigantes da ciência: Planck, Einstein, de Broglie, Schrödinger, Bohm e outros mais. Longe de criticar o genio criador de Bohr ou Heisenberg, criticamos sim, sua filosofia contida no Princípio da Complementaridade, sem dúvida obscurantista e autoritária.

A não cognoscibilidade (suposta) da experiência da dupla fenda defendida no trabalho de Monteiro<sup>1</sup> representa bem esse espírito misterioso em que alguns cientistas tentam, consciente ou inconscientemente, mergulhar a ciência. Um exemplo disso, vem de Feynman. Quando de sua estada no Brasil, teceu duras críticas ao modelo educacional brasileiro como sendo destituído de qualquer criatividade; somos forçados a admitir que ele tinha boa dose de razão<sup>30</sup>. No entanto, na discussão do experimento da dupla fenda, Feynman<sup>29</sup> o define como um mistério da natureza, mesmo que reconheça a dualidade onda-partícula dos elétrons. Pode-se perceber com isso a sutileza que existe por trás da incognoscibilidade defendida por aqueles que aceitam sem qualquer tentativa de refutação os dogmas da EC.

Para qualquer pessoa que aceite a tese de Popper de que a ciência deve ter suas assertivas questionáveis, o Princípio da Complementaridade se constitui em perigoso descaminho.

Afinal o que queremos?

Adorar os mistérios do mundo e viver no obscurantismo ou seguir a tradição grega que nos ensinou que a função da Razão é de nos acalmar do medo do capricho dos deuses?

Fala-se muito de uma pós-modernidade diante das limitações da Razão. Temos a convicção de que as filosofias pragmáticas, utilitárias, positivistas, existencialistas e místicas são equivocadas. Somente uma Razão ainda mais sutil conseguirá superar os graves problemas de fundamentos em que se encontra a Ciência e, por que não dizer, também o nosso Tempo.

#### Agradecimentos

Agradecemos aos dois árbitros as críticas e sugestões que enriqueceram o nosso trabalho.

#### Referências

1. M. A. Monteiro, Rev. Ens. Fis. **12**, 159 (1990).
2. F. L. da Silveira, Rev. Ens. Fis. **12**, 192 (1990).
3. M. A. Monteiro, referencia 1 p. 185
4. D.Bohm, Phys. Rev. **85**, 166 (1952); Phys. Rev. **85**, 180 (1952); Phys. Rev. **87**, 389 (1952); Phys. Rev. **89**, 458 (1953).
5. M. Bunge, *Epistemologia*, Curso de Atualização; T. A. Queiroz Editor, São Paulo (1987) 2a. edição Cap. 6 p.73.

6. H. Margenau, *La naturaleza de la realidad física (Una filosofía de la física moderna)*, Editorial Tecnos Madrid (1970) Cap.19 seção 10 pp.375-379. (Ver especialmente p.379).
7. A. Landé, *Nuevos fundamentos de la mecánica cuántica*, Editorial Tecnos Madrid (1968); Ver também. *Am. J. of Phys.* **43**, 701 (1975).
8. F. Selleri, *Le Grand Débat de la Théorie Quantique*; Flammarion, Paris (1986).
9. J. P. Vigié et al, *Causal particle trajectories and the interpretation of quantum mechanics*, in *Quantum Implications (Essays in honour of David Bohm)* Editado por B. J. Hiley e F. D. Peat; Routledge/Kegan Paul, London- NY (1988) p.169.
10. J. S. Bell, *Beables for quantum field theory*. Contido no mesmo volume em homenagem a David Bohm (ref. 9) p.227.
11. R. P. Feynman et al, *Lectures on Physics*, Vol 3 Cap.1 (exemplo de descrição do experimento da dupla fenda dentro da concepção de Copenhagen).
12. H. Putnam, *How to think quantum logically*, in *Logic and Probability in Quantum Mechanics* (Dordrecht, 1976).
13. Para uma idéia de uma tal concepção ver: (a) As idéias de Schrödinger expostas no livro de Selleri, *Paradoxos e Realidade*, Editorial Fragmentos, Lisboa (1990) Cap.3 pp. 110-111. (b) P. Gibbins, *Particles and Paradoxes*, Cambridge University Press, (1987) pp.43-45.
14. R. P. Feynman et al, ref. 11.
15. M. Born, *Física Atômica*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa Portugal, Cap. 4.
16. K. R. Popper, in *Le Grand Débat de la Théorie Quantique*, Franco Selleri, (ref.8) (Prefácio).
17. F. Selleri e G. Tarozzi, *Nuovo Cimento* Vol. **43B**, 31 (1978).
18. C. Philippidis et al, *Nuovo Cimento* Vol **52B**, 15 (1979).
19. L. Janossy e Zs. Naray, *Suppl. Nuovo Cimento* **9**, 588 (1958).
20. F. Selleri, *Phys. Lett.* **132A**, 72 (1988).
21. A. Garuccio et al *Phys. Lett.* **90A**, 17 (1982).
22. F. Selleri, *Australian Physicist* **27**, 214 (1990).
23. J. R. Croca et al, *Found. Phys. Lett.* **3**, 557 (1990).
24. M. Dagenais e L. Mandel, *Phys. Rev A* **18**, 2217 (1978).
25. J. M. Jauch, *São os Quanta Reais? (Um diálogo Galileano)* Nova Stella 1ª edição 1986 fig 8 p.84. Tradução e Notas de J.D.M.Vianna. Jauch retoma os interlocutores de Galileu (Salviati, Sagredo e Simplicio), porém atribui a fala dos realistas e racionalistas a Simplicio, o mesmo que nos "Discorsi" defendia as idéias de Aristóteles. Os realistas são assim considerados por Jauch como os "conservadores", que no dizer de Heisenberg, apegar-se-iam a "ontologia do materialismo". Jauch coloca a Complementaridade Bohriana na boca de Salviati e as vezes, na de Sagredo. Temos seríssimas dúvidas que o grande Galileu atribuisse a Salviati, o Princípio da Complementaridade (um jocoso anacronismo para dar ênfase).
26. F. Selleri, *Paradoxos e Realidade (Ensaio sobre os fundamentos da microfísica)* Editorial Fragmentos Lisboa (1990). Fig 7 p.79.
27. F. Selleri, *Física senza dogma (La conoscenza scientifica tra sviluppo e regressione)* Edizioni Dedalo Bari Itália (1989). Fig 4-4 p.93.
28. J. G. Cramer, *Rev. Mod. Phys.* **58**, 647 (1986). Nas páginas 671-673 as experiências de pensamento frase super-positivista de Wheeler se referem ao caso da dupla fenda. O artigo reivindica uma interpretação "transacional" da qual não esposamos. É interessante notar a frase super-positivista "No phenomenon is a phenomenon until it is an observed phenomenon" cujo teor também não esposamos. (Em relação ao experimento da dupla fenda, ver figura).
29. R. P. Feynman, ref. 11 Cap.1.
30. R. P. Feynman, *Surely you're Joking Mr. Feynman (Adventures of a Curious Character)*, (O Americano, Outra Vez pp. 179-198 (Ver especialmente p.193), Bantam Books Toronto-NY-London-Sydney-Auckland (1986).