

Existem Ondas Vazias ?

(Are there empty waves ?)

Jenner Barretto Bastos Filho

*Departamento de Física, Universidade Federal de Alagoas
Cidade Universitária, CEP 57072-970, Maceió, AL, Brasil*

Trabalho recebido em 19 de fevereiro de 1993

Resumo

Em Física, há pelo menos duas concepções do dualismo onda-partícula; uma delas segue a trilha de Bohr e Heisenberg e a outra segue a trilha de Einstein e de Broglie; elas têm matrizes filosóficas radicalmente distintas entre si e têm muito diferentemente a realidade. O Ensino tradicional de Mecânica Quântica omite quase inteiramente uma de tais concepções como se somente existisse a outra. Tal Ensino revela-se então pouco plural e autoritário na medida em que induz, ao menos implicitamente, apenas uma "Weltanschauung" (Concepção de Mundo). Em não oferecendo outras opções, o sistema tradicional não prevê elementos facilitadores de reflexão. Neste artigo, apresentamos uma discussão clara dessa situação. Apresentaremos um confronto entre as duas Escolas de Pensamento acima, no que concerne à leitura dos experimentos óticos de Dagenais/Mandel e de Janóssy/Naray. Ampliamos a nossa discussão, relacionando o problema da dualidade com algumas questões concernentes aos Princípios da Localidade e da Relatividade. - Seria a caça às ondas vazias um caminho racional a fim de dirimir o conflito entre essas Escolas de Pensamento ?

Abstract

There are, at least, two different dualistic conceptions in Physics; the first conception follows Bohr and Heisenberg and the other one follows Einstein and de Broglie. The above conceptions follow distinct philosophical traditions and therefore read reality differently. The conventional teaching of quantum mechanics considers only one of these traditions. This teaching appears to be authoritarian because it gives rise to only one "Weltanschauung". It is not open to criticism neither in the scientific nor in the philosophical sense. This paper presents a clear discussion of this situation. In it we confront the two above school of thought in relation to the interpretations of the optical experiments carried out by Dagenais/Mandel and Janossy/Naray. The scope of our discussion is widened with comments about the relations between the conceptions of duality, locality and relativity. - Would the empty waves search be a rational way to decide about the conflict between the above school of thought ?

I. Introdução

O objetivo do presente trabalho é apresentar, para professores e estudantes de Física, o conflito entre duas Escolas de Pensamento, acerca do problema da dualidade onda-partícula em mecânica quântica. As duas Escolas de Pensamento escolhidas são: a de Copenhague (E.C.) que é baseada no Princípio de Complemen-

taridade, o qual adota a mútua exclusão dos aspectos corpuscular e ondulatório, e, a do Dualismo Objetivo que adota a coexistência, a nível ontológico, desses aspectos. O conjunto de experimentos escolhidos para iluminar a nossa discussão é constituída pelos seguintes: o de Dagenais/Mandel (Fig. 1) e o de Janossy-Naray (Fig. 2). O problema da existência eventual das

ondas vazias é discutida e algumas tentativas, relativamente recentes, no sentido de sua detecção, são referidas. Não é objetivo do presente trabalho, contudo, uma discussão técnica e extensiva. O nosso objetivo é muito mais uma discussão conceitual que desperte os leitores para o tema.

O nosso trabalho será organizado da seguinte maneira: na seção II, procederemos a uma descrição dos experimentos de Dagenais /Mandel e Janóssy/Naray; nas seções III e IV, respectivamente, mostraremos as soluções da E.C. e do Dualismo Objetivo; em seguida, na seção V, procederemos a uma discussão sobre as ondas vazias; na seção VI procederemos a uma discussão sobre o Princípio da Localidade ou Separabilidade Einsteiniana e o paradoxo EPR. Na seção VII apresentaremos uma discussão ampliada na qual são relacionados, o dualismo objetivo e o conceito de localidade; ainda na seção VII, várias questões relacionadas são levantadas. Enfim, apresentaremos brevemente, na seção VIII, as nossas palavras finais.

II. Os experimentos de Janossy-Naray e de Dagenais-Mandel

Com as técnicas modernas, pode-se levar a termo experiências que usam fontes de baixíssimas intensidades compatíveis mesmo com o "pinga-fótons" um a um. Essa notável conquista possibilitou investigações delicadas, mormente aquelas relacionadas com a natureza do fóton.

Começemos descrevendo tais experimentos:

Um fóton singular é emitido pela fonte F; incide em um espelho semi-transparente EST (tipo pele de leopardo com metade de sua área com pintas prateadas e outra metade transparente, sendo disposto de tal maneira que a sua normal forme um ângulo de 45 graus com a linha de incidência do fóton). Ao longo das linhas de reflexão e de transmissão estão dispostas duas fotomultiplicadoras F1 e F2 tal como mostra a figura 1. Desta maneira, esquemática e simplificada, descrevemos a montagem da experiência de Dagenais/Mandel^[1] (doravante D.M.).

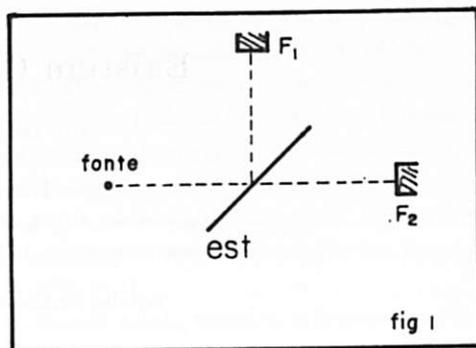


Figura 1. A figura acima exhibe a fonte de fótons singulares F, o espelho semi-transparente EST cuja normal forma um ângulo de 45 graus com a linha de incidência dos fótons; F1 e F2 são as duas fotomultiplicadoras.

No que concerne à experiência de Janóssy-Naray^[2] (doravante J.N.), a diferença essencial em relação à experiência de D.M. é que ambas as fotomultiplicadoras são substituídas por espelhos de reflexão total (ERT). O dispositivo todo é conhecido como interferômetro de Michelson.

O resultado de D.M. é que o fóton ou é detectado em F1 ou é detectado em F2. Para um número bastante grande de emissões singulares, a coincidência de detecção em F1 e em F2, é nula, ou seja, as coincidências são 100% anti-correlacionadas. Normalmente se considera que esse resultado é revelador do aspecto corpuscular na medida em que a energia do fóton é captada localmente ou em uma ou em outra das fotomultiplicadoras.

O resultado de J.N. é o seguinte: após um número muito grande de eventos singulares, é formada a figura de interferência (na zona de interferência Z da figura 2). Normalmente se considera que esse resultado é revelador do aspecto ondulatório. Muito significativo é que a interferência requer necessariamente superposições coerentes e essas têm lugar mesmo a nível de cada emissão quântica singular (fóton). O fóton singular é então revelado como uma onda.

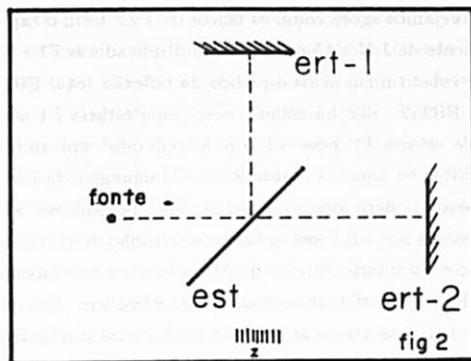


Figura 2. As fotomultiplicadoras da fig. 1 são substituídas pelos espelhos de reflexão total ERT-1 e ERT-2; Z representa a zona de interferência.

A comparação entre os resultados de D.M. e de J.N. constitui um exemplo do que geralmente se chama de paradoxo onda-córculo. Como o fóton singular poderia ser, ao mesmo tempo, onda e partícula?

A seguir, contraponemos duas soluções antagônicas.

III. A solução de Copenhague

Os físicos da Escola de Copenhague (E. C.)^[3] se utilizam das imagens-conceitos clássicas de onda e de partícula. No entanto, se utilizam delas com bastante reservas^[4]. Eles as mantêm, primeiramente para preservar o elo de correspondência entre os mundos clássico e quântico; em segundo lugar, para garantir a compreensibilidade mínima do mundo microscópico já que, segundo uma tal concepção, a compreensão deve passar por uma linguagem que usa das categorias clássicas; segundo a E.C. seria impossível transportar para o microcosmo, sem que se faça sérias reservas, as categorias macroscópicas clássicas de espaço-tempo, causa, onda e partícula; no entanto, segundo a E.C. também não se pode deixar de transportar, em certo sentido, tais categorias pois, em primeiro lugar, tem que se assegurar a correspondência entre os mundos clássico e quântico, e em segundo, os nossos cérebros (macroscópicos) somente digerem razões embasadas nas categorias acima referidas; trata-se portanto de tornar compreensível a incompreensibilidade^[5]. É interessante ressaltar que trata-se de uma escolha metodológica.

O dualismo da E.C. é baseado no Princípio da Complementaridade; experimentos revelando o aspecto ondulatório excluem o corpuscular e vice-versa; também

se pode dizer que experimentos descritos no espaço-tempo excluem a descrição causal e vice-versa; assim, onda e partícula são mutuamente excludentes; também o são, segundo a E.C., as descrições causais e espaço-temporais.

Após este preâmbulo sobre o Princípio da Complementaridade, vejamos como a E.C. lê o experimento de D.M..

O fóton interagiu com o EST; a função de onda do fóton é uma combinação linear

$$\Psi = c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$$

A função de onda Ψ ocupa toda a região macroscópica que liga EST a F1 e EST a F2; c_1 e c_2 são, respectivamente, as amplitudes de probabilidade de numa dada medida o fóton ser detectado na fotomultiplicadora F1 ou na fotomultiplicadora F2.

As probabilidades respectivas serão $|c_1|^2$ e $|c_2|^2$ (lembramos que c_1 e c_2 são, em geral, quantidades complexas). Admitindo uma situação totalmente simétrica, teremos,

$$\Psi = (2)^{-1/2}(\Psi_1 + \Psi_2)$$

Em um instante arbitrariamente pequeno antes da detecção (através da medida em F1 ou em F2), o fóton "está" simultaneamente nos dois caminhos, respectivamente, no que vai de EST a F1 e no que vai de EST a F2. É importante tecer algumas breves considerações sobre a razão pela qual colocamos aspas na terceira pessoa do singular do presente do verbo estar. A teoria quântica, na interpretação de Copenhague, fala de amplitudes de probabilidade do fóton ser detectado em uma ou em outra fotomultiplicadora; assim, dizer que o fóton "está" constituiria apenas numa adaptação em linguagem clássica de um fenômeno microscópico, fenômeno esse, segundo o Princípio da Complementaridade, não susceptível de tratamento, ao mesmo tempo, causal e espaço-temporal; no entanto, essa concepção, leva a um problema de princípio o qual passaremos a discutir.

Segundo a E.C., é o exato momento da detecção que "cria" a realidade local do fóton. A concepção realista é diferente; segundo a concepção realista, o fóton que foi detectado em F1, já estava, num instante arbitrariamente pequeno antes da detecção, no caminho EST-F1.

Seria pouco razoável conceber que um fóton detectado em F1 estivesse, num instante arbitrariamente pequeno antes da detecção, num ponto arbitrariamente próximo de F2. Se assim acontecesse, o senso realista diria que o "colapso" requereria um dado intervalo de tempo para que o fóton viajasse pelo caminho F2-EST-F1; suponhamos que as respectivas distâncias do espelho semitransparente (EST) a cada uma das duas fotomultiplicadoras sejam de 15 metros; assim, o fóton que estivesse arbitrariamente próximo de F2, num instante anterior, arbitrariamente pequeno, à sua detecção em F1, precisaria de um tempo mínimo de

$$t = \{(3.10m)/(3.10^8m/s)\} = 10^{-7} s.$$

A E.C., no entanto, diz que num instante, por exemplo, de 10^{-17} s. antes da detecção (instante esse, 10 ordens de grandeza mais curto que o mínimo acima) o fóton "está" simultaneamente nos dois caminhos macroscópicos (respectivamente EST-F1 e EST-F2). Isso significa que o colapso da E.C. ou é instantâneo ou é super-luminal.

A E.C., não pode admitir que num instante arbitrariamente pequeno antes da detecção, o fóton já estivesse em somente um dos caminhos pois isso equivaleria a dizer que podemos completar a teoria quântica; a E.C. concebe a função de onda Ψ como descrição exaustiva da realidade (a mais completa que se pode fazer); admitir o pressuposto realista acima seria o mesmo que admitir que se poderia completar causalmente a mecânica quântica.

Vários autores defenderam as concepções acima; Heisenberg^[6] argumentou que não se pode transportar para a realidade atômica a mesma ontologia do materialismo válida para a física clássica; Dirac^[7] argumentou que não cabe à teoria quântica oferecer imagens pois o que interessa é a descrição das leis através do formalismo matemático; von Neuman^[8] demonstrou um teorema segundo o qual a escolha metodológica de Copenhague era a única possível e deste modo, seria impossível completar causalmente a mecânica quântica. No entanto, há singelos contra-exemplos desse teorema o que mostra que ele não é suficientemente geral; Selleri^[9], recentemente, mostra essa situação com notável lucidez. Para o bem do pluralismo, outras escolhas metodológicas são possíveis e legítimas.

Vejam agora como os físicos da E.C. lêem o experimento de J.N. . Como as fotomultiplicadoras F1 e F2 são substituídas pelos espelhos de reflexão total ERT-1 e ERT-2, não há colapso nem onde estaria F1 nem onde estaria F2 pois o fóton é "refletido" em ambos os ERT, ou ainda, adaptando-nos à linguagem da física clássica, poderíamos dizer que os dois "meio-fótons" são refletidos nos ERT; esses, fazem o caminho de volta nos braços do interferômetro de Michelson, se recompõem no EST e interferem na zona de interferência. Em outras palavras, como se trata de cada emissão quântica singular, cada fóton interfere consigo próprio na zona de interferência. Poderíamos então concluir lançando mão da imagem, segundo a E.C., inadequada, da física clássica: se colocarmos as F, obteremos o aspecto corpuscular pois o fóton tornou-se localizado e "percorreu" um dos caminhos; se colocarmos os ERT obteremos o aspecto ondulatório pois o fóton "percorreu" ambos os caminhos; deste modo esses aspectos são mutuamente excludentes porém complementares.

Popper^[10] lembrou que as franjas de interferência são características do aspecto ondulatório mas são também características da chegada das partículas; deste modo teremos onda e partícula ao invés de onda ou partícula.

- Que diria disso os partidários da doutrina da exclusão mútua?

IV. Solução embasada no dualismo objetivo

A Escola de Pensamento que adota o dualismo objetivo não aceita o Princípio da Complementaridade de Bohr^[11-13]. Não aceita a doutrina da exclusão mútua de aspectos que, por outro lado, são complementares; não aceita que a realidade local do fóton dependa da interação entre o objeto quântico (no caso o fóton) e o instrumento de medida; não aceita que quando não se localiza o fóton tenha que se admitir que ele esteja simultaneamente nos dois caminhos; não aceita o caráter instantâneo do colapso copenhagueano que violaria o princípio einsteiniano da relatividade segundo o qual as ações devem se propagar no espaço de ponto para ponto e assim percorrer distâncias finitas não nulas em tempos finitos não nulos (discutiremos adiante as possíveis relações entre os Princípios da Relatividade e da Localidade); não aceitam as conclusões tiradas das famosas experiências de escolha retardada de Wheeler^[14] que vi-

olariam o Princípio da Causalidade na medida em que inverteriam a relação entre causa e efeito. Devido à importância dos Princípios, da Localidade e da Relatividade, e do paradoxo EPR (Einstein, Podolsky e Rosen), abriremos uma secção a fim de tentar esclarecer alguns aspectos em relação aos quais o consenso não existe.

Os dualistas objetivos concebem o fóton como objetivamente dual (onda real e partícula real) independentemente de atos de medida; evidentemente, não significa que a medida não interfira no fenômeno; significa, tão somente, que há uma realidade mesmo quando não se faz medida.

Os dualistas objetivos não aceitam a tese positivista segundo a qual o universo de discurso deve se restringir apenas às operações de medida, aos observáveis e coisas do gênero; isso seria uma limitação inaceitável à Razão e às conjecturas sobre o mundo; seria algo parecido a proibir uma pessoa do século XIX de falar sobre átomos, tal como procedeu Ernest Mach, com o argumento de que eram entidades não observáveis.

Vejam agora a solução do dualismo objetivo para a experiência de D.M.; o fóton singular, composto de uma partícula e uma onda associada, interage com o EST; dessa interação resulta que o corpúsculo ou é transmitido ou é refletido; em qualquer um dos casos, a onda associada se divide em duas, uma que acompanha o corpúsculo e outra, vazia, que vai na outra direção (Figuras 3 a, b, c).

A onda vazia, ou não transporta energia alguma ou a transporta em quantidade extremamente pequena para ser detectada. O corpúsculo, portador de energia, ou é detectado em F1 (Figura 3- b) ou é detectado em F2 (Figura 3-c) e assim, as coincidências de detecção em F1 e F2 são 100% anti-correlacionadas.

Vejam agora a experiência de J.N.. "Mutatis Mutandis", as novas situações serão agora representadas pelas figuras 4-a, 4-b, e 4-c.

No caso da experiência de J.N., a onda vazia, a onda que acompanha o corpúsculo e o próprio corpúsculo, são refletidos pelos ERT e se dirigem para o EST; em relação ao EST, vão nos interessar agora, as ondas, refletida da transmitida e transmitida da refletida; a interferência, necessariamente coerente, dessas ondas é que guiará o fóton, um a um, para a zona de interferência (Figura 5).

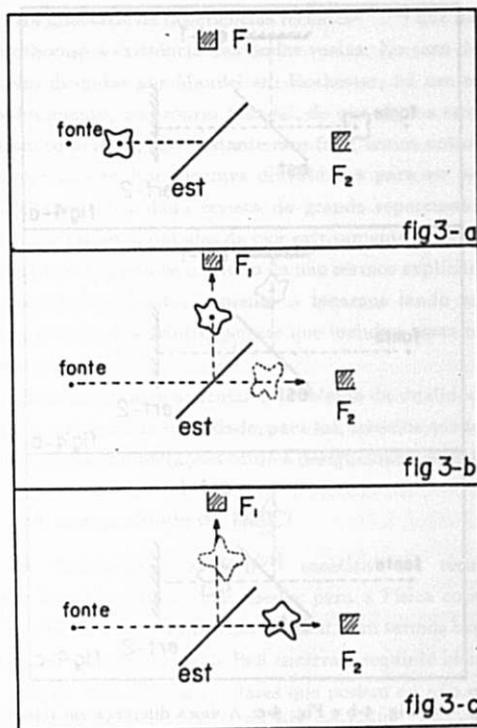


Fig. 3-a: O fóton, entidade dual (onda + corpúsculo reais) sai da fonte e se dirige para o EST. Fig. 3-b: O EST obriga a onda a se dividir em duas: uma que acompanha o corpúsculo na direção da reflexão, e outra, vazia, que é transmitida; a vazia não é detectada pela F2 pois, ou não carrega energia ou a carrega em quantidade insuficiente para ser detectada; o corpúsculo carrega energia e é detectado em F1. Fig. 3-c: A leitura deve ser feita de maneira "mutatis mutandis" em relação à fig. 3-b; comparando as figuras 3-b e 3-c pode-se notar que as coincidências de detecção em F1 e em F2 são 100% anti-correlacionadas.

Nos experimentos de baixíssimas intensidades, faz-se necessário um tempo suficientemente longo de exposição a fim de que a figura de interferência seja formada. Interpretar a figura de interferência como uma distribuição estatística, é, naturalmente, um argumento válido para feixes de luz de relativamente grandes intensidades; para baixíssimas intensidades, é necessário se dizer um pouco mais.

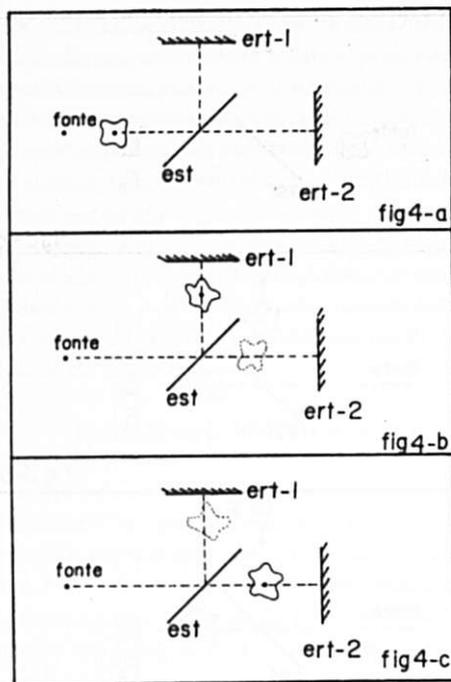


Fig. 4-a, Fig. 4-b e Fig. 4-c: A única diferença em relação às correspondentes figuras 3-a, 3-b, e 3-c, é que as fotomultiplicadoras F1 e F2 são substituídas pelos espelhos de reflexão total ERT-1 e ERT-2.

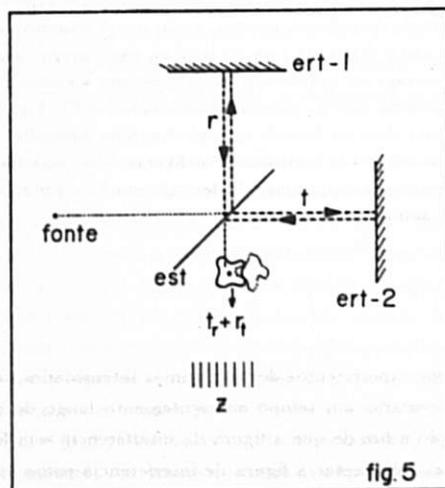


Figura 5. Em relação ao EST, as ondas transmitida da refletida e refletida da transmitida, interferem coerentemente e conduzem o corpúsculo para a zona de interferência. Trata-se de um processo a nível de cada emissão quântica singular.

Perguntaríamos pois:

- Se a dualidade objetiva não tivesse presente em cada emissão quântica singular (cada fóton) que razão haveria para cada fóton, independentemente dos demais, ser conduzido, um a um, para a zona de interferência?

Ele poderia ser conduzido, aleatoriamente, para qualquer região da zona; no entanto ele é conduzido *sempre para algumas regiões e nunca para outras.*

Se interpusermos qualquer obstáculo em algum dos braços do interferômetro de Michelson, a interferência é destruída para qualquer que seja o tempo de exposição; além disso, se modificarmos a posição de um dos ERT de tal maneira que a coerência seja destruída, a interferência também o será, independentemente de tempo de exposição. Este ponto merece melhor esclarecimento. Na experiência de J.N. as emissões singulares são produzidas a partir de um nível excitado do Mercúrio cuja vida média é de 10^{-9} s.; a onda emitida a partir da desexcitação desse nível deve ter um comprimento que é o produto do valor acima multiplicado pela velocidade da luz 3×10^{10} cm/s, o que dá 30 cm; ora, na experiência de J.N., os braços do interferômetro têm comprimentos da ordem de 15 m; uma onda de comprimento de 30 cm, está razoavelmente localizada e assim, pode-se garantir que ela não ocupa a região toda dos braços do interferômetro e por conseguinte, não interage conjuntamente com os ERT e o EST; essa garantia, é bastante importante na medida em que se pretende analisar o que acontece com tais emissões singulares (fótons) quando interagem com o EST; é óbvio que uma tal garantia não seria possível se a onda em questão fosse uma onda de rádio que ocupasse toda a região dos braços do interferômetro. No caso das emissões singulares de comprimento de onda de 30cm, o que se espera é que ao se afastar um dos braços do interferômetro de Michelson, em relação à posição simétrica, de uma distância de 15 cm ou menos, a coerência se mantenha, e por conseguinte, também a interferência; no entanto, se afastarmos um dos ERT de uma distância maior que 15 cm, em relação à posição simétrica, a coerência e a interferência se desfazem, independentemente do tempo de exposição. Como isso é verdade para baixíssimas intensidades compatíveis com emissões singulares, tudo leva a crer que essas superposições coerentes têm lugar para cada fóton, independentemente dos demais; logo,

cada superposição coerente, depende de entidades reais e não de fantasmas (apesar do nome brincalhão que Einstein deu: *Gespenterfelder*)^[15]. As ondas vazias (ondas quânticas) parecem ser perfeitamente plausíveis.

V. O que seria uma onda vazia ?

Vários pensadores importantes conceberam as ondas quânticas em vários contextos (por exemplo Einstein^[16-17], de Broglie^[18-19], Slater^[20], Schrödinger^[21], e, entre outros, até mesmo o próprio Bohr^[22]). Segundo Selleri^[11-13], o trabalho de Bohr, Kramer e Slater^[22] de 1924, marca um afastamento da tradição racionalista e merece análise especial.

Há pelo menos três tendências^[23] para conceber as ondas vazias. De Broglie acreditava que uma pequeníssima parcela de energia esteja presente na onda; há físicos que consideram que a onda é regularmente dotada de energia e momentum, mas que essas quantidades não são observáveis; Selleri, no entanto, propõe uma solução radical; segundo Selleri, as ondas vazias constituem um nível inteiramente novo de realidade; elas não carregam energia.

Perguntar-se-ia então, como quantidades físicas que não transportam energia e momentum poderiam ser detectadas ?

Selleri considera que essas quantidades revelariam sua realidade física modificando probabilidades de transição. Essas ondas quânticas seriam ondas de probabilidade no sentido ativo e não apenas como instrumental matemático como conceberia a E.C..

Há várias propostas de detecção das ondas vazias e alguns indícios (como a experiência de Blake/Scar^[24]) de que tais ondas devam ser uma realidade.

Algumas propostas podem ser, de forma bastante esquemática e simplificada, descritas assim: as ondas vazias penetram em uma região onde se encontra um sistema instável ou altamente metaestável. Se concebemos, especulativamente, essa onda vazia com energia $E = 0$ (contendo uma soma exata de uma parcela positiva e uma outra negativa, em módulo, exatamente iguais) é de se supor que esse balanço pode ser alterado, e assim, a onda vazia pode induzir transições. A caça às ondas vazias^[25] constitui um programa da mais alta importância. A sua eventual detecção, seguramente modificará não apenas o cenário existente, como abrirá um enorme leque de perspectivas novas para a Física.

Há uma série de experiências recentes^[26-28] que não corroboram a existência das ondas vazias. No caso daquelas dirigidas por Mandel em Rochester, há um reconhecimento, do próprio Mandel, de que alguns erros foram cometidos; não obstante esse fato, temos notícia de que uma réplica encontra dificuldades para ser publicada em uma dada revista de grande repercussão, sendo as razões apontadas de teor estritamente externalista. (Reservamo-nos o direito de não sermos explícitos quanto a esse ponto; somente o tocamos tendo em vista que um dos árbitros sugere que incluíse essas referências).

Passemos pois a articular o problema da dualidade com o problema da localidade; para tal, teremos que tecer algumas considerações sobre a desigualdade de Bell.

VI. A desigualdade de Bell

A desigualdade de Bell^[29] constitui um resultado importantíssimo, não apenas para a Física como também para toda a Filosofia Natural. Em termos bem simples, a desigualdade de Bell encerra a seguinte idéia:

Sejam dois objetos similares que podem ou não estar sujeitos a uma correlação pré-existente. Quando esses objetos estiverem separados entre si de uma distância arbitrariamente grande, ainda que a correlação pré-existente se mantenha, as realidades físicas desses objetos devem se manter independentes. Em outras palavras, ainda que a correlação pré-existente persista a distâncias arbitrariamente grandes, se um dos objetos for, por exemplo, destruído, *nada deve suceder instantaneamente ao outro em razão dessa destruição*.

Bell^[29], propôs uma quantidade matemática Δ , composta de funções de correlação, que expressa a independência acima referida. A desigualdade de Bell é dada por

$$\Delta \leq 2$$

Para tornar mais concreto o que acima foi colocado, tomemos o seguinte exemplo: Sejam dois ponteiros que giram com velocidades angulares exatamente iguais, de tal maneira que, em qualquer tempo, apontam para direções diametralmente opostas entre si. Admitamos que esses ponteiros sejam separados de distâncias arbitrariamente grandes de tal modo a não haver qualquer interação apreciável entre ambos. Os ponteiros continuarão a mostrar, em qualquer tempo ulterior, direções

diametralmente opostas; isso, evidentemente, não significa nem qualquer tipo de interação, nem transmissão, nem qualquer tipo de troca de mensagens. Essa manutenção da correlação pré-existente, mesmo a distâncias arbitrariamente grandes, em nada contradiz o Princípio da Localidade.

A quantidade Δ calculada para esse caso, satisfaz rigorosamente a desigualdade de Bell. O Princípio da Localidade está intimamente relacionado com o Princípio das Realidades Físicas Independentes; em outras palavras, em relação ao sistema de ponteiros em discussão, se alguém destroi, com um paralelepípedo, um dos ponteiros, nada deve suceder *instantaneamente* ao outro, em razão dessa destruição. A desigualdade de Bell $\Delta \leq 2$ é a expressão matemática do Princípio da Localidade, da Separabilidade no espaço e da Independência das Realidades Físicas.

A fim de fixar as idéias, podemos calcular a função de correlação, para o caso dos ponteiros acima, de uma maneira ainda mais geral que aquela correspondente ao caso das direções diametralmente opostas. Aqui, ambos os ponteiros giram com a mesma velocidade angular Ω ; um deles aponta para uma dada direção que pode ser caracterizada pelo ângulo α e o outro aponta para outra direção caracterizada pelo ângulo β . A função de correlação será

$$\begin{aligned} \rho_{a,b} &= (T)^{-1} \int_0^T [\cos(\Omega t + \alpha) \cos(\Omega t + \beta)] dt \\ &= (1/2) \cos(\alpha - \beta) \end{aligned}$$

onde

$$\Omega = 2\pi/T$$

Para dois dados valores arbitrários α e α' assumidos pela grandeza física a do ponteiro A e dois dados valores arbitrários β e β' assumidos pela grandeza física b do ponteiro B, a quantidade de Bell

$$\Delta = |\rho_{a,b} - \rho_{a,b'}| + |\rho_{a',b} + \rho_{a',b'}|$$

nos fornecerá sempre um valor $\Delta \leq 2$; como a função cosseno está compreendida no intervalo $[-1, +1]$, a desigualdade de Bell é rigorosamente satisfeita para o caso analisado; deste modo, o exemplo acima é rigorosamente local. Este exemplo singelo, mostra que a circunstância da função de correlação depender de dois

argumentos, respectivamente correspondentes a quantidades relativas a objetos espacialmente separados entre si, em princípio, nada tem a ver com a não-localidade; efetivamente a função de correlação $\{(1/2) \cos(\alpha - \beta)\}$ leva a um valor da quantidade de Bell Δ inteiramente compatível com a localidade porém contendo tanto o argumento α quanto o argumento β .

No entanto, a mecânica quântica usual viola a desigualdade de Bell; aliás, dito de uma maneira mais geral, a mecânica quântica usual, para alguns casos, viola a desigualdade de Bell, enquanto para outros casos, ela a satisfaz; centraremos a nossa atenção, justamente nos casos de violação; para tais casos, somos forçados a concluir que a mecânica quântica não está de acordo com o Princípio da Localidade, ou seja, que a separabilidade no espaço e a independência das realidades físicas de objetos espacialmente separados a distâncias arbitrariamente grandes, em geral, não valem. Vejamos, brevemente, um exemplo:

Sejam duas partículas, por exemplo dois elétrons, cujo par tem autovalores nulos para ambos os operadores seguintes: componente z do spin total e quadrado do spin total. Em mecânica quântica, o par é descrito pela função singleto

$$|\Psi_s\rangle = (2)^{-1/2} \{|u^+\rangle |v^-\rangle - |u^-\rangle |v^+\rangle\}$$

onde $|u^+\rangle$ e $|u^-\rangle$ se referem, respectivamente, aos estados "up" e "down" para o elétron A, e $|v^+\rangle$ e $|v^-\rangle$ se referem, respectivamente, aos estados "up" e "down" para o elétron B. Os auto-estados $|u^+\rangle$ e $|u^-\rangle$ são dados respectivamente pelos spinores

$$|u^+\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad |u^-\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Da mesma forma, os auto-estados $|v^+\rangle$ e $|v^-\rangle$ são representados pelos spinores

$$|v^+\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad |v^-\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

A função de correlação correspondente, será dada pela média em mecânica quântica

$$\langle \Psi_s | (\sigma \cdot a) * (\tau \cdot b) | \Psi_s \rangle$$

onde σ e τ são representados por

$$\sigma = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \hat{e}_x + \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \hat{e}_y + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \hat{e}_z$$

$$\tau = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \hat{e}_x + \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \hat{e}_y + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \hat{e}_z,$$

o vetor a é representado por

$$a = \begin{pmatrix} a_x & 0 \\ 0 & a_x \end{pmatrix} \hat{e}_x + \begin{pmatrix} a_y & 0 \\ 0 & a_y \end{pmatrix} \hat{e}_y + \begin{pmatrix} a_z & 0 \\ 0 & a_z \end{pmatrix} \hat{e}_z,$$

e o vetor b é representado por

$$b = \begin{pmatrix} b_x & 0 \\ 0 & b_x \end{pmatrix} \hat{e}_x + \begin{pmatrix} b_y & 0 \\ 0 & b_y \end{pmatrix} \hat{e}_y + \begin{pmatrix} b_z & 0 \\ 0 & b_z \end{pmatrix} \hat{e}_z$$

onde $(\sigma \cdot a)$ constitui a componente de σ segundo a direção a , para o elétron A e $(\tau \cdot b)$ constitui a componente de τ segundo a direção b relativa ao elétron B; a e b são direções arbitrárias, respectivamente para os spins dos elétrons A e B; convém ressaltar que o operador

$$(\sigma \cdot a) = \begin{pmatrix} a_x & a_y - ia_z \\ a_x + ia_y & -a_z \end{pmatrix}$$

age sobre os auto-estados $|u^+\rangle$ e $|u^-\rangle$, e o operador

$$(\tau \cdot b) = \begin{pmatrix} b_x & b_y - ib_z \\ b_x + ib_y & -b_z \end{pmatrix}$$

age sobre os auto-estados $|v^+\rangle$ e $|v^-\rangle$.

O singleto (bra) é

$$\langle \Psi_s | = (2)^{-1/2} \{ \langle u^+ | \langle v^- | - \langle v^+ | \langle u^- | \},$$

onde

$$\langle u^+ | = (1 \ 0) \quad ; \quad \langle u^- | = (0 \ 1)$$

$$\langle v^+ | = (1 \ 0) \quad ; \quad \langle v^- | = (0 \ 1)$$

Repare que os spinores "ket" são representados por matrizes colunas enquanto os do tipo "bra" são representados por matrizes linha. Note que para o caso específico, somente precisamos trocar linha por coluna (operação chamada de transposição); não foi preciso fazer o complexo conjugado de cada número que compõe o spinor pelo fato de todos eles serem reais. Fazendo-se as contas, obtemos

$$\langle \Psi_s | (\sigma \cdot a) * (\tau \cdot b) | \Psi_s \rangle = -a \cdot b = -|a||b| \cos(a, b) = -\cos(a, b)$$

uma vez que $|a| = |b| = 1$.

A quantidade de Bell correspondente será,

$$\Delta = |-\cos(a, b) + \cos(a, b')| + |-\cos(a', b) - \cos(a', b')|$$

onde a e a' são duas direções quaisquer para o spin s correspondente ao elétron A, e b e b' são duas direções quaisquer para o spin τ correspondente ao elétron B. Escolhamos o seguinte conjunto de ângulos:

$$\theta_{a,b} = \theta_{a',b} = \theta_{a',b'} = \theta$$

$$\theta_{a,b'} = 3\theta$$

Para uma tal escolha, a quantidade de Bell correspondente será

$$\Delta = |-\cos \theta + \cos(3\theta)| + |-2 \cos \theta|$$

Pode-se traçar uma curva Δ versus θ e verificar que a violação máxima da desigualdade de Bell tem lugar para o ângulo θ igual a 45 graus, ou seja, $(\pi/4)$ radianos, ângulo esse, para o qual, a quantidade de Bell assume o valor $2(2)^{1/2}$. Interessante é que há alguns valores de θ para os quais a desigualdade de Bell é perfeitamente satisfeita; por exemplo, ela é satisfeita para $\theta = \pi/2$ e para alguns valores de θ próximos de $\pi/2$.

VII. Discussão

Tal como nos referimos, o nosso objetivo central aqui é de apresentar um confronto entre dois dualismos de matrizes filosóficas distintas e que seja proveitoso para despertar estudantes e professores para o tema; o confronto, entre a adoção da mútua exclusão e a adoção da coexistência da dualidade a nível ontológico, conduz à questão da eventual existência das ondas vazias; o conflito ainda não foi dirimido e os resultados experimentais são claramente insuficientes para algum tipo de conclusão mais sólida. Em relação ao experimento de J.N., é pois legítimo cogitar sobre o que faz o fóton singular, depois de interagir com o EST, recuperar a coerência, depois da ida e da volta através dos braços do interferômetro de Michelson; não devemos nos esquecer que nesse caso, ambos os braços do interferômetro de Michelson são necessários. As ondas vazias, não constituem reivindicação alguma de transcendência; muito pelo contrário, elas devem ser um nível da realidade que explique tal recuperação de coerência no espaço, no tempo, e causalmente.

O programa filosófico^[30] que adota:

(i) A existência real, independentemente de nós, dos objetos quânticos, ou sejam, elétrons, fótons, neutrons, etc. (Realismo).

(ii) A separabilidade no espaço de tais objetos, de tal maneira que eles tenham realidades físicas independentes se são infinitamente distantes (Localidade), é chamado de *Realismo Local*. O Realismo Local é o Programa de Einstein e de vários continuadores. A procura das ondas vazias e a desigualdade de Bell são aspectos importantes desse programa de pesquisa; gostaríamos de tecer algumas considerações que ajudassem a esclarecer a conexão que existe entre dualidade e desigualdade de Bell. Vejamos a questão do colapso copenagueano e o que acontece num instante arbitrariamente pequeno antes da detecção. Ora, uma coisa é dizer, que antes da detecção há uma probabilidade para o fóton ser detectado em uma ou em outra das fotomultiplicadoras, admitindo isso apenas como uma insuficiência da teoria (caráter incompleto, pelo menos); outra bem diferente é dizer que não existe nenhuma outra possibilidade de escolha; deste modo, nos restaria apenas admitir que a realidade local do fóton requereria um colapso instantâneo, violando o princípio da localidade na medida em que a instantaneidade implicaria em repercussão imediata em todos os pontos do universo, o que não está de acordo com o Princípio das Realidades Independentes. Vê-se portanto, que o programa das ondas vazias, que é dualista, é também local; conclui-se por conseguinte, também, a sua relação com a desigualdade de Bell.

Passemos então a discutir os seguintes tópicos:

(a) O fato de que, até então, as ondas vazias não tenham sido detectadas, não quer dizer que elas não existam; os átomos, somente no presente século, tiveram uma realidade experimental; nada nos leva a crer que eles não existissem muito antes de constituírem essa realidade.

(b) O programa do Realismo Local de Einstein, foi fortalecido com os importantíssimos resultados a nível cosmológico de Taylor e Hulse (ver os comentários de Fleming^[31]); como se sabe, a teoria geral da relatividade de Einstein é rigorosamente local; insere-se perfeitamente bem no contexto do Realismo Local (tal como foi explicado acima). A teoria geral da relatividade de Einstein teve uma comprovação experimental recente e simplesmente estupenda; não se tratou apenas de um efeito sutil como o da anomalia constituída pela precessão do periélio de Mercúrio que é de 42 segundos de grau por século; Taylor e Hulse observaram

que em relação ao pulsar PSR1913+16 há uma anomalia semelhante a do planeta Mercúrio, só que muito maior: da ordem de 4,2 graus por ano; o fato da teoria geral da relatividade (rigorosamente realista e local) ter sido brilhantemente verificada é uma mostra luminosa de que o Programa de Einstein tem grande força e atualidade. Ainda mais: em relação ao pulsar PSR1913+16, observou-se que o período do sistema analisado diminuía numa taxa de $(2,40 \pm 0,09) \cdot 10^{-12}$ s s⁻¹, inferindo-se daí uma perda de energia do sistema. A teoria geral da relatividade prevê que esse efeito é devido às ondas gravitacionais e dá um valor de $(2,403 \pm 0,02) \cdot 10^{-12}$ s s⁻¹; como se vê, o acordo é notável; as ondas gravitacionais, que até então não eram observáveis, parecem que começam a sê-lo. Como se pode facilmente inferir, as ondas gravitacionais somente são concebíveis no contexto do Realismo Local; e as razões são, simplesmente, as seguintes: primeiramente porque essas ondas existem independentemente de nós (Realismo); em outras palavras, elas são uma realidade no espaço-tempo e não uma realidade criada, nem por medidas nem tampouco por mente de quem quer que seja; em segundo lugar, porque suas ações, não agindo instantaneamente, percorrem o espaço, e deste modo, obedecem ao princípio das realidades independentes dos objetos infinitamente separados (Localidade ou Separabilidade Einsteiniana).

(c) A adoção do dualismo objetivo, que tem origem em grandes conquistas cognitivas da física como as relações $E = h\nu$ e $p = h/\lambda$ (respectivamente, de Planck/Einstein e de De Broglie) sustenta que qualquer objeto quântico é dual, isso é, é composto de uma onda extensa e de uma partícula localizada portadora de energia; a dualidade é preservada, mesmo no caso de objetos quânticos instáveis, isso é, que decaíam em outros.

(d) O gráviton, corpúsculo mediador das interações gravitacionais, não foi, até então detectado. Segundo o programa de Einstein, numa teoria quântica do futuro, o gráviton estará relacionado com ondas associadas; um dualismo, dentro de uma teoria rigorosamente local, onde, naturalmente, a desigualdade de Bell seja rigorosamente satisfeita.

(e) Há resultados experimentais que são interpretados pela maioria da comunidade dos físicos como favo-

recendo a mecânica quântica usual, e por conseguinte, a não-localidade. Esses resultados, violariam a desigualdade de Bell.

Há diversas deduções teóricas da desigualdade de Bell (deterministas e probabilistas) e tudo leva a crer que trata-se de um resultado teórico sólido. Há quem não compartilhe dessa opinião; por exemplo, Popper considera a desigualdade de Bell como constituindo simplesmente uma tautologia^[32] e por isso, não se constituindo em critério algum para decidir sobre a localidade. Bem entendido, Popper é um realista local se bem que, não pelo critério da desigualdade de Bell. Tal como nós entendemos, a desigualdade de Bell é sólida e significativa; nesse ponto divergimos de Popper.

Voltemos, pois, a questão dos resultados tidos como violando a desigualdade de Bell. Ora, basta que se admita os pressupostos de Realismo e de Separabilidade, para se obter a desigualdade de Bell. *Nenhum resultado experimental obtido até então, violou a desigualdade de Bell original.* Há no entanto, deduções de outros tipos de desigualdade de Bell os quais são concluídos não mais apenas com os dois pressupostos acima; além desses dois pressupostos acima referidos, algumas hipóteses adicionais são inseridas. A fim de dar ao leitor um exemplo claro dessa situação, em uma das formulações, a região de localidade a ser assumida por uma grandeza^[13] adimensional G deve estar compreendida no intervalo $(-0,2; 0,8)$, isso no que diz respeito à desigualdade de Bell original, sem qualquer hipótese adicional nem qualquer mecanismo "ad hoc". Ora, com a admissão de hipóteses adicionais, a região de localidade vê-se drasticamente alterada para $(-0,002; 0,038)$, ou seja um "comprimento" que é apenas 4% do anterior. Vê-se portanto, que a inserção de hipóteses adicionais faz encolher a região de localidade para um valor que é apenas 4% daquele concluído a partir da desigualdade de Bell original. *A violação tem lugar em relação ao intervalo curto mas não em relação ao intervalo maior.*

Porque os 96% do caminho têm que ser retirados no "braço" através de hipóteses adicionais? O que realmente testa um experimento desse tipo? A realidade? A Localidade? Ou simplesmente as Hipóteses Adicionais?

Tudo o que se precisa para recuperar a localidade é a remoção das hipóteses adicionais que não são nem verificáveis, nem têm qualquer coisa a ver com o Realismo

Local.

Más qual é a natureza de tais hipóteses adicionais?

Nos experimentos de Aspect e colaboradores^[33], supõe-se que o conjunto dos fótons medidos tem o mesmo comportamento que o conjunto de todos os fótons. Ora, essa hipótese, sem dúvida, está ligada ao pressuposto de que os ensembles em mecânica quântica sejam homogêneos; pode-se demonstrar que os *ensembles em mecânica quântica não são homogêneos*^[34-35], e assim tanto a hipótese usada quanto os próprios experimentos estão sob graves suspeitas. É conveniente ainda ressaltar que a eficiência dos reveladores de fótons utilizados nos experimentos concretamente realizados é muito baixa: entre 6% e 28% no mais favorável dos casos.

Em que sentido um experimento desse tipo pode ser considerado crucial? Os leitores tem o direito de refletir, ouvindo todas as correntes de pensamento.

(f) Outra questão importante diz respeito ao aspecto completo ou não da mecânica quântica usual e do seu significado; por exemplo é importante esclarecer se a mecânica quântica usual implica ou não em ações instantâneas à distância e quais as diferenças fundamentais entre os Princípios da Localidade e da Relatividade. Adiantamos que o consenso acerca desse tema é demasiado escasso.

Quando Einstein, Podolsky e Rosen^[36] escreveram o famoso trabalho de 1935, a reivindicação era que a teoria quântica deveria ser melhorada e que ela não poderia se constituir em descrição exaustiva da realidade - ela não era completa; não obstante o seu sucesso instrumental, ela padecia de graves defeitos. Na colocação de Schrödinger^[37], a mecânica quântica era tal que permitia pilotar à distância um sistema sem se ter acesso ao mesmo, o que lhe parecia ser absolutamente inaceitável. No entanto, a réplica de Bohr^[38] ao artigo de Einstein, Podolsky e Rosen foi no sentido de que aquela era a descrição exaustiva e que seria impossível outra escolha; segundo Bohr, deveríamos modificar os nossos critérios de realidade e de causalidade; o Princípio da Complementaridade e o teorema de impossibilidade de von Neumann iam exatamente nessa direção. Em 1965, Bell^[29] formula a questão em termos de uma desigualdade; a desigualdade de Bell é a expressão matemática de que a contradição entre a mecânica quântica usual e

a filosofia do realismo local poderia ser decidida experimentalmente.

Perguntamos, nesse instante da discussão, se a mecânica quântica usual envolve ou não interações instantâneas à distância. Como já vimos, a persistência de correlação pré-existente não implica em não-localidade. Qual seria então o sentido do colapso da função de onda?

Podemos demonstrar, rigorosamente, que se o aparato de medida for considerado uma entidade clássica, tal como Bohr sustentou, a mecânica quântica usual conduz necessariamente a uma ação instantânea à distância. Isso foi demonstrado muito convincentemente por Selleri e Garuccio^[39]. Se considerarmos que o aparato de medida seja uma entidade quântica, isto é, satisfazendo ao princípio da superposição, as quantidades físicas não se conservam. Há uma terceira possibilidade que constitui na teoria das medidas imperfeitas de Wigner, Araki e Yanase^[40], teoria essa que corrige "ad hoc" esses defeitos. Na teoria quântica da medida de Wigner Araki e Yanase não há mais ações instantâneas à distância e as quantidades físicas se conservam. No entanto, essa teoria, ainda mantém a violação da desigualdade de Bell. Conclui-se que essa não-localidade, constituída pela violação da desigualdade de Bell, nada teria a ver com ações instantâneas à distância nem com trocas de energia; no entanto, resta fortemente um sabor de grande insatisfação; o que seria, de fato, a não localidade? Se não é persistência da correlação pré-existente, se não é interação instantânea à distância e se não constitui troca alguma de energia, que significado teria? Seria, simplesmente, um defeito da teoria que salva "ad hoc" alguns aspectos mais não consegue salvar outros?

Há, no entanto, um ponto bastante irônico: Se todos reconhecem que a teoria quântica da medida à la Bohr implica em ação instantânea à distância e que, ademais, esse aspecto foi salvo "ad hoc" algumas décadas depois pela teoria de Wigner, Araki e Yanase, então, pelo menos nesse sentido, poder-se-ia dizer que a crítica de Einstein, Podolsky e Rosen, sobre o caráter incompleto da teoria quântica, é absolutamente pertinente. E assim, a vitória de Einstein, pelo menos no que diz respeito ao caráter da completeza, deveria ser, na pior das hipóteses, consensual.

(g) O que seria pois a não localidade?

Como já vimos, persistência de correlação pré-existente nada tem a ver com não-localidade; para escapar das ações instantâneas à distância, formula-se "ad hoc" uma teoria da medida que a elimina; no entanto, permanece a violação da desigualdade de Bell. A crítica de Einstein revelou-se absolutamente pertinente pois ele se referia à mecânica quântica de 1927 e a teoria da medida que supostamente completava a mecânica quântica data dos anos sessenta em diante.

Qual seria então o sentido dessa violação?

Há algumas tentativas de explicação: probabilidades negativas, retroações no tempo, efeitos super-luminares e outras mais.

Ao nosso ver, o conceito de probabilidade negativa parece algo muito forçado para reinterpretar a desigualdade de Bell e salvar a localidade; a retroação no tempo violaria uma das evidências da Física: a irreversibilidade caracterizada pela segunda lei da termodinâmica; os efeitos super-luminares (táquions) constituem uma conjectura interessante; no entanto não sabemos que razões teríamos para associar táquions ao estado singleto, por exemplo. Há de fato uma incompatibilidade entre o Princípio da Relatividade e a eventual existência de táquions; ambos podem estar errados, mas ambos, evidentemente, não podem estar corretos. De fato, há argumentos fortes contra o Princípio da Relatividade, o qual atribui a todos os observadores inerciais do Universo um mesmo valor para a velocidade c da luz. Partindo de outro princípio explicativo, se pode obter todas as grandes conquistas cognitivas da teoria (superposição das ações instantâneas a distância, conversões de massa em energia etc.) ao se postular outro tipo de sincronização.

(h) Vejamos as experiências pensadas de Wheeler^[41], chamadas de experiências de escolha retardada. Imaginemos um fóton singular interagindo com o EST em um tempo t_0 ; suponhamos que essa interação, que tenha início em t_0 , se prolongue até um tempo $t = t_0 + \delta$. Segundo a E.C., não é o instante $t_0 + \delta$ que determinará se o fóton será captado como uma partícula ou como uma onda; a escolha, segundo Wheeler, é feita "a posteriori": se colocarmos as fotomultiplicadoras F, obteremos a localização do fóton em alguma das duas possibilidades, o que significa que o fóton percorreu um dado caminho (aspecto corpuscu-

lar); se colocarmos os espelhos de reflexão total ERT, obteremos a interferência, o que mostra que o fóton percorreu ambos os caminhos (aspecto ondulatório). É importante dizer que, segundo uma tal interpretação, decidimos no futuro, e não no instante $t_0 + \delta$, se o fóton percorreu um ou dois caminhos. Já vimos que o colapso da função de onda constitui uma violação do princípio da localidade; agora aqui, com esse exemplo de Wheeler, parece haver, bem claramente, uma inversão entre causa e efeito. Wheeler tira dessa sua interpretação, conclusões hiperbólicas a nível cosmológico como aquelas segundo as quais podemos "a posteriori" modificar a História do Universo. É famosa a sua frase super-positivista: "No phenomenon is a phenomenon until it is an observed phenomenon". É claro, que toda essa interpretação, tão distante daquilo que poderia ser razoável, pode ser evitada, simplesmente, se assumirmos a natureza dual (objetiva) do fóton. Note bem, que o "mistério" subsiste apenas diante da insistência em se atribuir ao fóton uma natureza simples. Se, ao invés, seguirmos a trilha de Einstein e de Broglie e considerarmos o fóton como entidade objetivamente dual, desaparece o "mistério".

- Por que tanta insistência em violar a causalidade e a localidade através de uma dada escolha metodológica, quando existem, claramente, possibilidades muito mais plausíveis?

VIII. Palavras finais

O artigo inicialmente concebido para apresentar um confronto entre duas correntes dualistas da física quântica, e em especial sobre a importante questão da eventual existência das ondas vazias, nos levou também a abordar os importantes problemas da localidade, desigualdade de Bell, conceito de realidade, colapso da função de onda e outros. De fato, esses conceitos se relacionam apesar do escasso consenso dentro da comunidade científica.

O nosso estudo, claro está, não tem nenhuma pretensão de completeza. Infelizmente, são pouquíssimas as publicações em nosso país que propiciam discussões deste tipo para um público relativamente amplo que envolva professores, estudantes e pesquisadores em Física. Ademais, o artigo, tal como está escrito pode interessar a Filósofos. Nesse sentido, temos plena convicção, da sua relevância e oportunidade.

Finalmente, temos certeza de que apresentando as teorias de forma conjectural e pluralista, na tradição da racionalidade, e no combate ao dogmatismo, podemos confrontar-las melhor. Este objetivo propedêutico é da mais alta relevância. Além do mais é, ao nosso ver, essencial levar aos estudantes e demais categorias, que todas as teorias, mesmo aquelas de grande abrangência e de sólida comprovação empírica, são entretidas de conjectura, no sentido de Xenófanes^[42].

Agradecimentos

Somos particularmente gratos às fertilíssimas discussões com o Prof. Franco Selleri durante a nossa estada em Bari-Itália. Bem entendido, imprecisões, em que pese o nosso cuidado, são de nossa inteira responsabilidade.

Referências e Notas

1. M. Dagenais e L. Mandel, Phys. Rev. A **18**, 2217 (1978).
2. L. Janossy e Zs. Naray, Suppl. Nuovo Cimento **9**, 588 (1958).
3. N. Bohr, *Discussions with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics 1949*, in, *Atomic Physics and Human Knowledge*, Science Editions INC New York (1961) p.32 - 66.
4. N. Bohr, ref.3; na página 39 pode-se ler o seguinte texto: "For this purpose, it is decisive to recognize that, however far the phenomena transcend the scope of classical physics explanation, the account of all evidence must be expressed in classical terms."
5. K. R. Popper, in *Le Grand Débat de la Théorie Quantique de Franco Selleri (ver Prefácio)*. No prefácio do livro de Selleri, Popper escreveu o seguinte: "Le point le plus important, dans ce lavage de cerveau, c'est le problème de la compréhension. Une part l'enseignement de Bohr - le maître à penser et le professeur d'Heisenberg, de Pauli et de presque tous les autres fondateurs de la mécanique quantique - consistait en ceci: ne cherchez pas à comprendre

- la mécanique quantique, elle est presque totalement incompréhensible. Bohr essaya d'expliquer cette incompréhensibilité, c'est-à-dire de rendre compréhensible l'incompréhensibilité.*" É importante notar que Popper e Selleri são, ambos, críticos duros e importantíssimos do Princípio da Complementaridade de Niels Bohr.
6. W. Heisenberg, Física e Filosofia, Coleção Pensamento Científico, Editora Universidade de Brasília, segunda edição, tradução de Jorge Leal Ferreira (1987). Ver capítulo VIII pp.99-111, especialmente pp. 99-100; ver também o capítulo V p. 65 onde Heisenberg se refere à crítica de Einstein como embasada no "realismo dogmático".
 7. P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford University Press (1958). No prefácio deste livro, Dirac, um pró-copenhagueano discreto, escreveu, se referindo à natureza da realidade quântica, o seguinte texto: "*Her fundamental laws do not govern the world as it appears in our mental pictures in any very direct way, but instead they control a substratum of which we cannot form a mental picture without introducing irrelevancies.*"
 8. J. von Neumann, *The Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton, New York (1955).
 9. F. Selleri, *Rivista di Storia d. Scienza* 2, 545 (1985).
 10. K. R. Popper, in *Le Grand Débat de la Théorie Quantique de Franco Selleri* (Prefácio).
 11. F. Selleri, *Le Grand Débat de la Théorie Quantique*, Flammarion Paris (1987).
 12. F. Selleri, *Paradoxos e Realidade (Ensaio sobre os fundamentos da microfísica)* Editorial Fragmentos, Lisboa, Portugal (1987).
 13. F. Selleri, *Física senza dogma (La conoscenza scientifica tra sviluppo e regressione)* Edizione Dedalo Bari Italia (1989).
 14. J. A. Wheeler, *Delayed Choice Experiments and the Bohr-Einstein Dialog*, conferência realizada em Londres(5/6/1980) no congresso da American Philosophical Society e da Royal Society. Ver também a referência 12 cap. IV pp. 136-140 na qual são feitos comentários duros em relação às conclusões de Wheeler.
 15. É interessante notar que esse nome reflete um sentimento de bom humor e, diferentemente daquilo que à primeira vista pode parecer, reflete também, com ironia refinada, uma atitude realista e racionalista. É interessante aqui reproduzir o texto de Bohr sobre Einstein, exatamente a esse respeito (ref. 3 p. 36): "*The discussions, to which I have often reverted in my thoughts, added to all my admiration for Einstein a deep impression of his detached attitude. Certainly, his favoured use of such picturesque phrases as "ghost waves (Gespensterfelder) guiding the photons" implied no tendency to mysticism but illuminated rather a profound humour behind his piercing remarks.*"
 16. A. Einstein, *Ann. d. Phys.* 17, 132 (1905).
 17. A. Einstein, *Phys. Zeitschr.* 18, 121 (1917).
 18. L. de Broglie, *Ann. de Physique* 3, 22 (1925).
 19. L. de Broglie, Conferência Nobel 1929. Nessa conferência de Broglie escreve: "*L'électron...doit être associé à une onde et cette onde n'est pas un mythe; sa longueur d'onde peut être mesurée et ses interférences prédites.*" Citação a partir da referência da ref. 11 pp. 91- 92).
 20. J. C. Slater, *Nature* 116, 278 (1925).
 21. E. Schrödinger, *Ann. d. Phys.* 79, 361 (1926).
 22. N. Bohr, H.A. Kramer, J.C. Slater, *Phil. Mag.* 47, 785 (1924). A concepção de Bohr e de Kramer era a de ondas virtuais. Essa não era a concepção original de Slater. A teoria de Bohr, Kramer e Slater (BKS) anunciou que a lei da conservação de energia seria válida, apenas, estatisticamente; assim, não haveria correlação temporal entre os eventos quânticos singulares; Bothe e Geiger (*Zeitschr. Phys.* 32, (1925) p. 639) e Compton e Simon (*Phys. Rev.* 25 (1925) p. 306) refutaram experimentalmente as conclusões de BKS. Isso parecia dar razão aos realistas e causalistas; no entanto, opções metodológicas desviaram a atenção desses resultados experimentais importantes (para uma análise aguda dessa situação, ver referências 11 - 13. Einstein, em sua breve estada no Brasil em 1925, proferiu conferência no Clube de Engenharia (Rio de Janeiro); nessa conferência, ele fez alusão ao trabalho de BKS. Vejamos o texto de Einstein a esse respeito: "*Uma síntese da teoria dos quanta*

- e da ondulatória não se conseguiu, até hoje, apesar de todos os esforços dos cientistas. Há pouco tempo, tentou Bohr, juntamente com Kramer e Slater, explicar teoricamente, as propriedades da luz, sem lançar mão da hipótese de que toda a radiação é constituída de quanta". (Citado a partir do livro A vinda de Einstein ao Brasil de A. P. Riceri, Edições Prandiano p. 55 (1988).
23. F. Selleri, Phys. Lett. A132, 72 (1988).
 24. G. D. Blake, D. Scarl, Phys. Rev. A (1979) p. 1948.
 25. F. Selleri, Australian Physicist 27, 214 (1990).
 26. L. J. Wang, X. Y. Zou e L. Mandel, Phys. Rev. Lett. 66, 1111 (1991).
 27. X. Y. Zou, T. Grayson, L.J. Wang e L. Mandel, Phys. Rev. Lett. 68, 3667 (1992).
 28. P. Grangier, G. Roser e A. Aspect, Europhysics Letters 1, 173 (1986).
 29. J. S. Bell, Physics 1, 195 (1965).
 30. Ver referência 13.
 31. H. Fleming, Ciência Hoje Vol 16 n. 96, dezembro de 1993 pp. 12 - 13.
 32. Ver referência 13.
 33. Ver referência 28 e referências nela contidas.
 34. F. Selleri, Philosophia Naturalis 28, 1 (1991).
 35. J. B. Bastos Filho e F. Selleri, Foundations of Physics, 1º fascículo 1995 (no prelo).
 36. A. Einstein, B. Podolsky e N. Rosen, Phys. Rev. 47, 777 (1935).
 37. E. Schrödinger, Proc. Camb.Phil. Soc. 31, 555 (1935).
 38. N. Bohr, Phys. Rev. 48, 696 (1935).
 39. A. Garuccio e F. Selleri, *Action at a distance in Quantum Mechanics*, trabalho apresentado por ocasião das Celebrações em Paris do Centenário de Nascimento de Einstein (6-9 de junho de 1979).
 40. Ver, por exemplo, M. M. Yanase, in B. d'Espagnat, ed., *Foundations of Quantum Mechanics*, Italian Physical Society, Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi", Course II, Academic Press, New York (1971).
 41. J. A. Wheeler, ver referência 14.
 42. Xenófanes, in Pré-Socráticos, Coleção Os Pensadores, Abril Cultural São Paulo, primeira edição, agosto de 1973; o fragmento 34, p.72 é o seguinte: "E o que é claro, portanto, nenhum homem viu, nem haverá alguém que conheça sobre os deuses e acerca de tudo o que digo; pois, ainda que no máximo acontecesse dizer o que é perfeito, ele próprio não saberia; a respeito de tudo existe uma opinião".