

# A REALIDADE NA FÍSICA QUÂNTICA

*J.R. Croca*

Departamento de Física  
Faculdade de Ciências – Universidade de Lisboa  
Campo Grande Ed. C8 1749 016 Lisboa  
email: croca@fc.ul.pt

## **1 Introdução**

Até ao advento da mecânica quântica em 1927, quando se impôs o paradigma borheano, o homem de ciência, e de um modo geral, a grande maioria da gente culta acreditava no primado do espaço e do tempo como ingredientes, como elementos fundamentais para nos ajudar a entender a Realidade. Neste paradigma da física clássica a Realidade era considerada como independente do observador. Assim, qualquer fenómeno físico podia, pelo menos em linha de princípio, ser seguido no espaço e no tempo. Esta atitude corresponde à aceitação do causalismo em ciência. Quer dizer, do ponto de vista da ciência clássica, cada acontecimento tem sempre necessariamente um antecedente e consequentemente um futuro numa perfeita relação de causa efeito.

Com a introdução do paradigma indeterminista da Escola de Copenhague também dito borheano ou ortodoxo este universo de causalidade é alterado radicalmente. O nexos de causa efeito, de que cada acontecimento tem necessariamente uma causa, é abandonado. Neste novo paradigma a Realidade passa a depender do observador. Em certo sentido poderemos mesmo dizer que a Realidade é criada pelo próprio observador.

Por mais estranho que nos possa parecer Niels Bohr e a sua Escola foram capazes de elaborar, dentro deste paradigma indeterminista, uma teoria física dotada de elevado rigor matemático capaz de prever os resultados de milhares de experiências com uma grande precisão. Apenas ultimamente surgiram situações, muito especiais, que estão para além da sua capacidade de previsão desta teoria indeterminista.

Os acontecimentos que deram origem ao aparecimento do paradigma não causal surgiram no início do século passado. Experiências de alta precisão mostraram, sem qualquer sombra de dúvida, que as entidades quânticas, tais como as moléculas, os átomos, os prótons, electrões, fótons, etc., tinham, na verdade, características muito singulares.

Por um lado tinham de ser susceptíveis de localização espacial pontual e, por outro, lado tinham de ser extensas.

Para que melhor compreender o difícil problema colocado no início do século XX aos homens de ciência consideremos uma experiência que desempenhou um papel fundamental na elaboração da estrutura conceptual da mecânica quântica. Trata-se da experiência das duas fendas, ou dos dois buracos que se encontra esquematizada na figura seguinte, Figura 1.

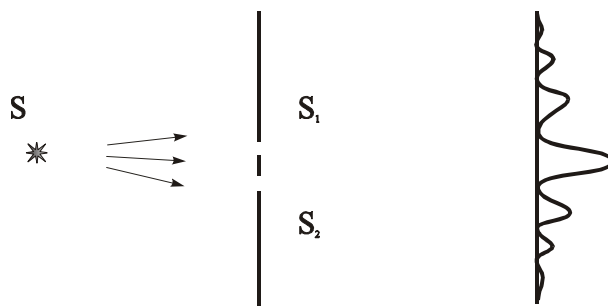


Figura 1- Experiência das duas fendas com sistemas quânticos

A fonte especial de partículas quânticas  $S$ , por exemplo de electrões, emite partículas de tal modo que no dispositivo experimental apenas se encontra sempre uma e só uma partícula de cada vez. A partícula quântica emitida pela fonte, ao chegar ao ecrã tem a possibilidade de ser absorvida ou eventualmente de passar por uma das fendas. Este facto pode ser comprovado pela colocação de detectores na frente das duas fendas. Verifica-se que umas vezes é activado ou um ou outro detector. Nunca se verificando o caso em que os dois detectores são activados simultaneamente. Esta última hipótese é de todo impossível pois, como vimos, a fonte está preparada de tal modo que no dispositivo experimental apenas se encontra uma e uma só partícula de cada vez. Portanto a conclusão a tirar é que a partícula quântica ou passa por um buraco ou pelo outro. A ser válida tal conclusão isto implicaria que a experiência poderia ser realizada umas vezes com a fenda de cima tapada, tendo a partícula quântica a possibilidade de passar pela fenda de baixo, outras com a fenda de baixo tapada podendo o sistema quântico passar unicamente pela fenda de cima. Nesse caso no alvo detector teríamos uma sucessão de impactos correspondentes às partículas que provinham ou da fenda de cima e ou da fenda de baixo, dando origem a sobreposição de duas distribuições contínuas. No entanto as experiências mostram, sem qualquer sombra de dúvida, que a distribuição dos impactos, das partículas na região de detecção, longe de ser contínua segue pelo contrário uma repartição interferencial. Esta distribuição interferencial tem zonas de máximo onde se acumulam a maior parte das partículas e regiões de mínimo onde as partículas quânticas nunca podem ser detectadas.

A conclusão a tirar da experiência é que o electrão, essa estranha entidade quântica, pelo facto de dar origem a uma figura interferencial tem que ter propriedades ondulatórias, quer dizer, propriedades extensas, tendo que passar ao mesmo tempo pelas duas fendas.

Assim para dar conta dos resultados experimentais, naturalmente com as duas fendas abertas, somos confrontados com dois resultados aparentemente contraditórios.

O ente quântico passa:

Por um buraco **ou** pelo outro

Por um buraco e pelo outro

Ou seja o ente quântico passa, em simultâneo, por um só e pelos dois buracos.

É esta estranha situação que a Figura 2 procura ilustrar.

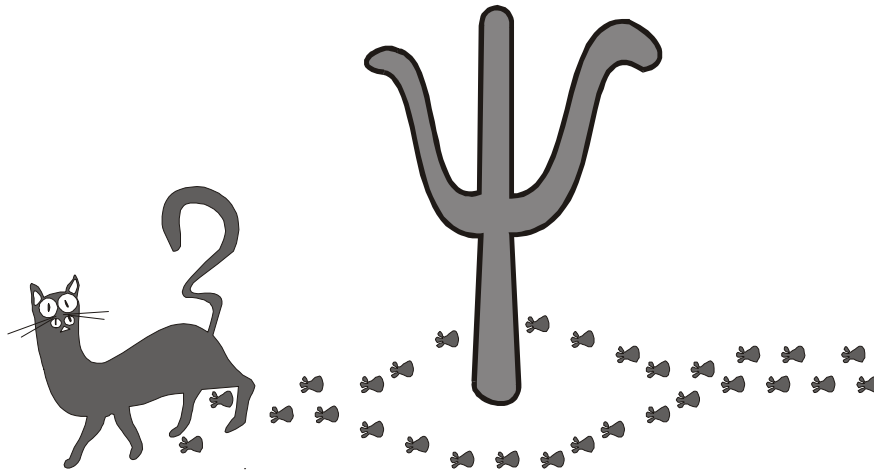


Figura 2- Ilustração caricata do problema da dualidade colocado pela experiência das duas fendas.

A figura procura realçar o facto do ente quântico, neste caso o representado burlescamente pelo gato, ter, não se sabe como, de passar simultaneamente pelos dois lados do obstáculo e voltar a materializar-se posteriormente numa única entidade.

Ora, estudos anteriores haviam mostrado que os sistemas clássicos se comportavam de dois modos inteiramente distintos. Ou se manifestavam como partículas, e neste caso eram assim susceptíveis de serem localizados precisamente numa região pontual, ou então manifestavam um carácter extenso de ondas ocupando toda uma região, maior ou menor, de espaço. Portanto é aqui, precisamente neste ponto, que se dá a rotura com a física clássica.

Para conciliar este problema, de um sistema quântico ser simultaneamente extenso e localizado, Niels Bohr, em vez de procurar um modelo causal mais complexo de partícula quântica, para explicar aquela aparente contradição exibida pelos sistemas quânticos, optou por rejeitar a causalidade criando todo um novo paradigma, um novo modo de encarar a realidade. As razões profundas que levaram Bohr a esta atitude não são, ainda hoje, muito claras. Nestas condições, a realidade objectiva do paradigma clássico causal é assim rejeitada dando origem a uma realidade virtual, ora de onda, ora de corpúsculo. Consoante a situação experimental ora se manifestando um ou outro aspecto desta realidade virtual.

Este paradigma indeterminista, ao explicar a experiência das duas fendas vai assumir que a entidade quântica, a que nós chamamos electrão, não possui uma existência objectiva antes da medida, antes da observação. Antes de qualquer medida tudo o que existe é um conjunto de potencialidades, no caso da presente experiência, de onda ou de corpúsculo. Nestas condições ao chegar ao ecrã com as duas fendas a entidade quântica ao passar pelas duas fendas, ao mesmo tempo, manifesta o seu carácter potencial de extensão, quer dizer o aspecto ondulatório dando origem a duas ondas

potenciais que se propagam e que conseqüentemente vão interferir potencialmente. Quando no alvo detector vai aparecer um único ponto que corresponde à manifestação, à materialização do aspecto potencial corpuscular do electrão. Naturalmente, ao fim de um número suficiente de detecções, correspondentes cada uma à chegada de um electrão, no alvo detector surge a figura de interferências. Portanto, consoante as circunstancias, a entidade quântica, a que chamamos electrão, ora manifesta a sua característica potencial de onda ora o seu carácter potencial de localização, de partícula. Nunca podendo as duas características de existência potencial se manifestar simultaneamente.

A ideia que está por trás da experiência das duas fendas, onde o sistema quântico tem apenas duas hipóteses, de passar pela fenda debaixo ou pela de cima, pode ser generalizada a mais de duas possibilidades conduzindo ao conceito de medida em mecânica quântica. Esta situação encontra-se ilustrada na figura seguinte, Fig.3, que representa o cão quântico.

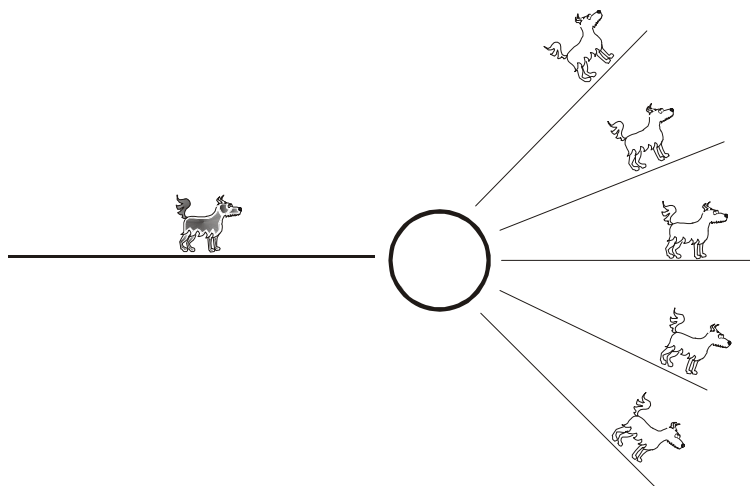


Fig. 3 – O cão quântico

A Figura 3 representa um cão que se desloca por um certo percurso até que encontra uma rotunda de onde derivam cinco caminhos. Em linha de principio o cão pode seguir por qualquer destes caminhos. No entanto, de acordo com a interpretação ortodoxa, o cão vai ter de seguir por todos os caminhos possíveis. Como não há nenhum cão real que possa seguir simultaneamente por cinco caminhos segue-se que o cão perde a sua realidade física objectiva e tornando-se assim num cão potencial. Um estranho cão quântico seguindo potencialmente por cada um dos caminhos possíveis. Se afirmássemos que o cão mantinha a sua realidade e que portanto seguia unicamente por um dos caminhos disponíveis então estaríamos na mesma situação da experiência das duas fendas dizendo que, o sistema quântico, o electrão tinha passado por uma fenda ou pela outra. Neste caso seríamos obrigados a rejeitar o carácter extenso dos sistemas quântico e, então, não seríamos capazes de explicar as interferências que se observam experimentalmente!

Quer queiramos, quer não, dentro do paradigma indeterminista de Copenhague, teremos de sustentar que o cão quântico segue potencialmente por todos os caminhos possíveis simultaneamente.

Quando o cão real é detectado numa das vias, dá-se então o colapso do sistema e todas as múltiplas potencialidades convergem para uma única. Quer dizer, antes da medida o cão encontrava-se potencialmente presente em todos os percursos possíveis, no acto da medida materializa-se instantaneamente numa única via. Naturalmente depois da medida, depois da interacção todas as outras possibilidades, todos os cães potenciais, correspondentes aos diversos percursos possíveis de serem percorridos, se anulam excepto aquele em que o cão é de facto observado.

Até agora tratámos de experiências directas em que a transformação dos múltiplos estados potenciais num único estado real resulta de uma interacção física observável. Vejamos agora o caso de uma medida indirecta proposta, já há alguns anos, por um físico de nome Renninger, onde se dá a transformação das múltiplas potencialidades numa só, o chamado colapso da função de onda, sem qualquer interacção física observável. Consideremos a situação representada na Figura 4 onde se vê uma fonte de partículas quânticas, neste caso de fótons, emitindo, como é norma nestas experiências, uma partícula de cada vez.

Na sua progressão o sistema quântico encontra um ecrã com um orifício que atravessa indo posteriormente manifestar o seu aspecto extenso dando origem a uma onda esférica. Na sua propagação esta onda encontra um pequeno detector  $D_1$  onde poderá eventualmente ser detectado ao fim de um certo tempo  $t_1$ . Se o fóton activar este detector um observador colocado fora do sistema observa uma luz acender. No caso do fóton não ser detectado no primeiro pequeno detector, ele prosseguirá a sua marcha sendo, mais tarde, detectado no detector semiesférico  $D_2$  colocado bastante longe do primeiro. Tal como na experiência das duas fendas e do gato de Schrödinger, antes da medida o fóton tem duas hipóteses, uma de ser detectado no primeiro detector  $D_1$ , outra de ser visto no segundo detector  $D_2$ . Portanto o fóton inicial transforma-se em dois fótons potenciais correspondentes aos trajectos possíveis.

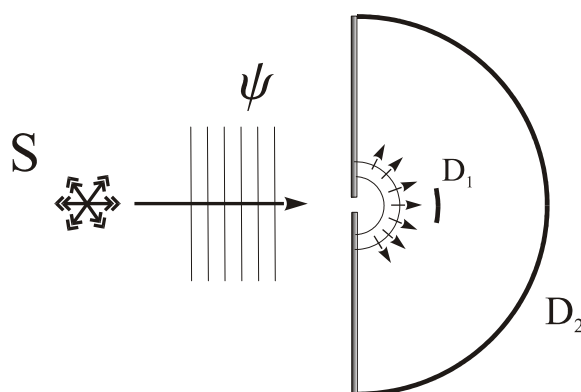


Fig.4 - Experiência de Renninger

Consideremos a situação em que a luz ligada ao pequeno detector foi acesa. Neste caso concluímos que o fóton chegou a  $D_1$ , então a possibilidade dele chegar, mais tarde, ao detector gigante, transforma-se em zero. Quer dizer as duas possibilidades iniciais modificaram-se para uma única devido, tal como anteriormente, a uma interacção física observável do fóton com o detector.

Vejam agora a outra possibilidade. Ao fim do tempo  $t_1$ , o tempo necessário para o fóton chegar ao pequeno detector, a luz não acendeu. Neste caso concluímos que o fóton será mais tarde detectado no detector gigante  $D_2$ . Assim o colapso da função de onda, a transformação dos múltiplos estados potenciais num único estado dá-se sem que haja qualquer interacção física.

Nesta medida, muito especial, o colapso das múltiplas probabilidades deu-se, como vimos, contrariamente com o que sucedia anteriormente sem que houvesse qualquer interacção física com o sistema. Esta situação levou os físicos ortodoxos a afirmar que o colapso da função de onda, a redução das múltiplas possibilidades não é, em última análise, devida a uma interacção física mas sim obra da **consciência** do observador. Este ao tomar consciência da não interacção, do fóton com o primeiro detector, reduz as duas potencialidades a uma só realidade objectiva.

Nestas condições, segundo o paradigma ortodoxo, a transformação do conjunto das múltiplas potencialidades, desprovidas de qualquer realidade objectiva, num único sistema real deve-se, em última análise, à **consciência** do observador.

Assim, de acordo com estes autores, se o mundo tem realidades objectiva, independente de nós observadores humanos parciais e limitados deve-se ao facto de que existe uma **CONSCIÊNCIA UNIVERSAL – DEUS** que ao observar todas as múltiplas potencialidades de existência torna real aquela de que nós, simples mortais, nos damos conta. Nesta perspectiva **Deus** é o único garante da Realidade objectiva do mundo.

Vejam agora brevemente como foi possível construir um modelo físico e matemático coerente capaz de integrar esta epistemologia que nega a realidade objectiva da natureza.

Como se viu tornou-se necessário conciliar a extensão com a localização.

Para conseguir tal fim Niels Bohr vai partir do princípio de que Tudo é constituído por vibrações, por ondas. Estas ondas são ondas harmónicas infinitas no espaço e no tempo. Quer dizer, pela sua própria natureza ocupam todo o espaço e existem desde sempre e continuarão a existir para sempre.

Por outro lado define, ainda, duas regras uma de natureza física outra matemática, a saber:

- 1) Só as ondas infinitas tem uma energia bem definida.
- 2) Uma onda finita resulta sempre, necessariamente, da soma de ondas infinitas.

Como corolário natural da última regra segue-se, neste modelo, que cada onda finita, sendo constituída por muitas ondas infinitas, tem necessariamente tantas energias quantas as das ondas infinitas constituintes. Como uma partícula física é localizada segue-se que tem de ser formada por muitas ondas infinitas cada uma com a sua energia bem definida. Assim a partícula teria, simultaneamente uma multiplicidade de energias. Ora como as partículas observadas tem uma energia bem definida segue-se que antes da medida as partículas, e por conseguinte todos os sistemas quânticos, não podem ter

qualquer existência real. Antes da medida tudo o que temos, neste paradigma, é um conjunto de múltiplas partículas potenciais cada uma com uma energia bem definida.

Assim com a introdução destas ondas Bohr consegue de modo natural a extensão. Para obter a localização não tem mais que fazer senão somar as diversas vibrações infinitas. Naturalmente que o preço a pagar é a negação da realidade objectiva.

Estas ondas harmónicas infinitas no espaço e no tempo ao sobreporem-se, ao misturarem-se, vão interferir dando origem a estruturas localizadas como se observa na Fig.5, onde está representada uma secção de cinco ondas harmónicas infinitas.

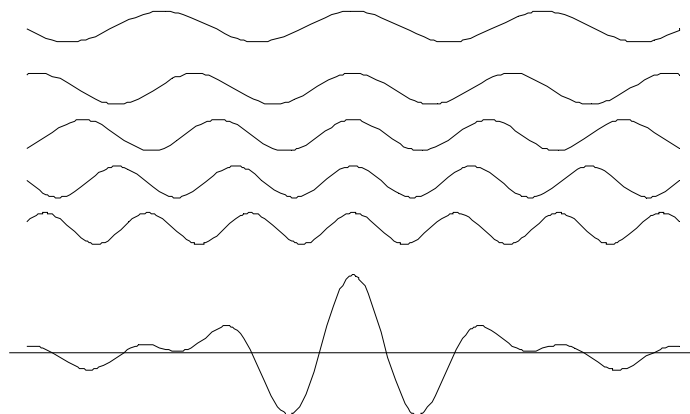


Fig.5 – Sobreposição de diversas ondas harmónicas infinitas dá origem a estruturas localizadas.

Estas ondas ao sobreporem-se vão interferir dando origem a uma interferência com uma região relativamente localizada. Pela judiciosa combinação de mais ondas pode, em princípio, conseguir-se uma localização tão boa quanto queiramos.

O processo matemático que permite realizar esta operação da composição de ondas harmónicas infinitas, chama-se análise de Fourier.

A análise de Fourier é uma técnica matemática muito usada presentemente na moderna tecnologia nomeadamente nas tecnologias da informação

Neste paradigma as estruturas localizadas não são mais, como vimos, composições de ondas harmónicas infinitas que preenchem todo o espaço e tempo.

Neste contexto, consideremos dois objectos que à primeira vista parecem afastados um do outro. Uma vez que afinal são constituídos pelas mesmas ondas não são, na realidade, mais que manifestações da mesma entidade subjacente. Qualquer acção praticada num dos objectos tem implicações instantâneas no outro. Esta acção traduz-se, em última análise, pela modificação da forma de combinação das ondas constituintes.

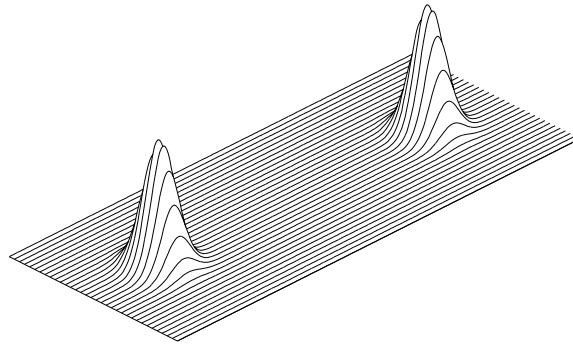


Fig.6 – A combinação, a interferência, de ondas harmónicas, infinitas no espaço e no tempo, dá neste caso origem a duas estruturas localizadas aparentemente independentes.

Compreende-se assim perfeitamente a razão porque, dentro do paradigma borheano, a separabilidade no espaço e no tempo é apenas uma mera ilusão dos nossos sentidos. Esta ilusão resulta do facto de estarmos habituados ao modo clássico de olhar para as coisas é considerado, pelos seguidores da escola de Copenhague, como arcaica e caduca.

Segundo Niels Bohr, com o advento da nova física o **homo quanticus** ao transcender os conceitos de espaço e de tempo consegue adquirir assim o atributo da omnipresença, até então apenas apanágio de Deus.

Apesar dos seus êxitos o paradigma indeterminista de Copenhague foi sempre combatido por alguns dos mais importantes físicos do século XX, como por exemplo Alberto Einstein, Luís de Broglie, Schrödinger, Max Planck e muitos outros.

No entanto, uma vez que tal combate foi sempre efectuado aceitando os pontos de partida de Niels Bohr no que diz respeito à aceitação do paradigma de Fourier, estes autores não tinham, na realidade, qualquer hipótese de fugir ao ciclo vicioso da não localidade intrínseca que é inerente àquela estrutura formal. Tal como um automobilista quando, por motivos alheios à sua vontade, se vê subitamente numa auto-estrada seguindo no sentido contrária àquela que quer, sem qualquer hipótese de voltar para trás. Só depois de caminhar vários quilómetros, por vezes muitos, alcança o primeiro nó de saída onde tem possibilidade de sair, fazer inversão de marcha, e seguir então na direcção desejada.

Do esforço destes homens e dos seus seguidores, que jamais abdicaram da causalidade, resultou presentemente a possibilidade de recuperar em termos cientificamente sólidos a existência de uma Realidade objectiva independente do observador.

Foi assim possível elaborar uma nova teoria causal e local mais geral que a mecânica quântica ortodoxa indeterminista.

Esta nova teoria contém, naturalmente, formalmente como caso particular a teoria quântica borheana.



Enquanto que Bohr dava o primado às ondas infinitas, à inseparabilidade intrínseca quer no espaço quer no tempo, negando assim a possibilidade de qualquer individualização real dos sistemas e, em última análise, à individualidade própria do homem, agora, nesta teoria mais geral, o ponto de partida são também vibrações, só que neste caso em vez de ondas infinitas o ponto de partida são ondas finitas.

A diferença dos dois modelos resulta sobretudo do facto que estas novas ondas em vez de serem necessariamente infinitas são agora finitas e de extensão variável. A cada uma destas ondas finitas é atribuída uma energia bem determinada em oposição ao paradigma de Fourier. Estas hipóteses de partida estão perfeitamente de acordo com aquilo que nós observamos no nosso dia a dia. Nunca ninguém observou uma vibração infinita no espaço e no tempo!

Resumindo os novos pontos de partida são:

- 1) Tudo é constituído por vibrações, ondas, finitas.
- 2) Existem ondas finitas com energia bem definida.

Estes postulados diferentes conduzem a situações práticas distintas como se procura ilustrar na Figura 7. Esta figura mostra a diferença resultante da utilização das ondas finitas, também ditas onduletas, e das ondas infinitas de Fourier.

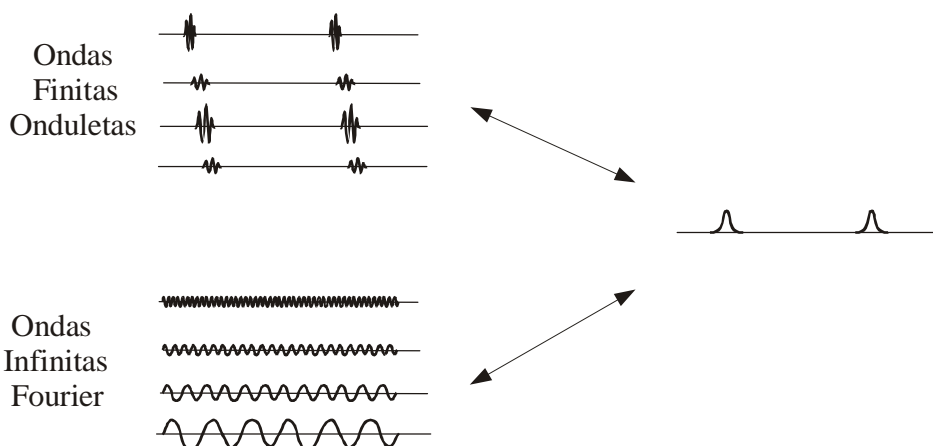


Fig.7 – Combinação de ondas finitas ou infinitas, ambas produzindo estruturas localizadas,

Como se pode observar a combinação de várias ondas finitas ou infinitas vai gerar, devido à interferência, duas regiões representando duas partículas. Consideremos o caso em que uma destas partículas se mantém fixa e que apenas a outra se move. Em termos de ondas infinitas de Fourier as duas partículas são, na verdade, a mesma entidade pois são constituídas pelas mesmas ondas. Assim uma modificação na posição de uma partícula implica a alteração de todas as ondas, em todo o espaço e todo o tempo, para que a sobreposição, a interferência, das ondas seja agora construtiva na nova região. No caso das ondas finitas, como cada partícula é constituída por um grupo onduletas finitas independentes, a modificação da posição de uma partícula em nada afecta a outra. Apenas o grupo de onduletas afectas à partícula que se deslocou é afectado. Esta

consequência resulta do facto do grupo de ondas finitas que a constituem uma partícula ser, como vimos, independentes do grupo das onduletas que formam a outra partícula.

A aceitação de uma estrutura formal matemática em onduletas finitas em substituição da análise de Fourier infinita, no espaço e no tempo, para a descrição das entidades quânticas, permite recuperar de um modo natural localidade e a causalidade. Deste modo fica aberta a possibilidade da criação de uma sólida teoria quântica local e causal. E assim, mais uma vez, é restabelecida a existência de uma Realidade objectiva independente do observador. Por outro lado, e não menos importante, a individualidade dos sistemas, incluindo a do homem, fica assim salvaguardada. Naturalmente a extensão e a correlação, maior ou menor entre os sistemas, fica também assegurada, bastando para isso estender a dimensão das ondas finitas tanto quanto queiramos. No limite poderemos mesmo obter a completa interligação entre os sistemas.

Vejamos a título de exemplo como neste contexto da nova mecânica causal mais geral como a experiência das duas fendas é perfeitamente compreendida sem ser necessário rejeitarmos a existência de uma realidade objectiva.

Para isso vamos primeiro introduzir o modelo de partícula quântica desenvolvido inicialmente por Luís de Broglie. Neste contexto causal e local uma partícula quântica é um sistema deveras complexo, constituída por uma parte extensa, mas finita, a onda na qual se pode encontrar uma singularidade, um núcleo possuindo a maior parte da energia da partícula. Esta onda como tem muito pouca energia não pode ser detectada pelos detectores normais. A sua função é de guia da singularidade através processos não lineares sendo portanto responsável pelos fenómenos de interferência.

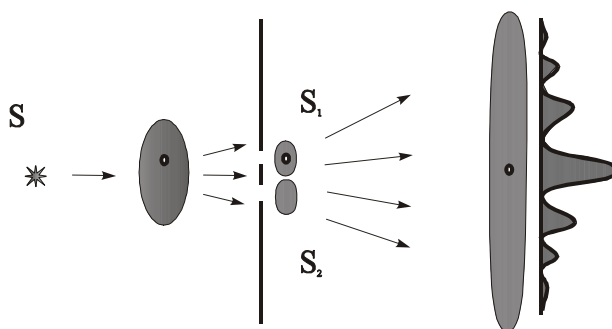


Fig.8 – Experiência das duas fendas à luz da teoria causal

A Figura 8 representa o esquema da experiência das duas fendas vista à luz da teoria causal. A partícula quântica, emitida pela fonte, é constituída por uma parte extensa a onda, que tem a possibilidade de passar simultaneamente pelas duas fendas, dando origem a duas ondas. A singularidade seguindo numa das ondas, ou passa por uma fenda ou por outra. Ao propagarem-se as duas ondas vão sobrepor-se dando assim origem às interferências observadas. Como se pode observar, deste modo bastante simples e intuitivo, é possível resolver, sem qualquer necessidade negar a existência de uma realidade objectiva, a aparente contradição da partícula quântica ter que passar simultaneamente pelas duas fendas e ao mesmo tempo passar por uma ou por outra. A onda passa por uma fenda e por outra simultaneamente, a singularidade, essa passa por uma **ou** por outra.

Esta moderna teoria mais geral que recupera a existência da realidade objectiva da Natureza, permite explicar em termos causais a contradições e os impasses resultantes da utilização da mecânica quântica ortodoxa indeterminista. Por outro lado, como já se fez referência, convém ainda salientar que foram recentemente postas em evidência situações experimentais muito especiais que escapam ao âmbito de descrição da teoria indeterminista de Niels Bohr. Estes resultados experimentais são perfeitamente explicadas no universo da nova mecânica quântica não linear e causal.

Estes factos mostram as limitações e fraquezas da teoria indeterminista e a necessidade da sua substituição pela nova teoria causal mais geral contém, naturalmente, do ponto de vista formal e preditivo a teoria indeterminista da Escola de Copenhague como um caso particular.

Para terminar só quero acrescentar que os progressos recentes da ciência conduzem novamente, apesar da forte oposição das correntes conservadoras, à reposição da causalidade e por conseguinte à recuperação da existência de uma Realidade física objectiva independente do observador.

#### **Algumas referências:**

J. Andrade e Silva e G. Lochak, *Quanta Grãos e Campos*, Instituto de Novas Profissões, Lisboa.

F. Selleri, *Paradoxos e Realidade*, Editorial Fragmentos, 1990

J.R. Croca, - *Causalismo Versus Determinismo na Física Contemporânea*, Vértice, Setembro (1990)

J.R. Croca and R. N. Moreira, *Indeterminism Versus Causalism*, *Grazer Philosophische Studien*, 56(1999)151.

J.R. Croca, *Beyond Non-Causal Quantum Physics*, Chapter of the Book in *Modern Nonlinear Optics*, Part 2, Second Edition, Edited by Myron Evans. Series Editors I. Prigogine and Stuart Rice. Evans, (John Wiley & Sons, New York 2002)