

A RAZÃO NA FÍSICA QUÂNTICA

J.R. Croca

Departamento de Física

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Campo Grande Ed. C8

1749-016 Lisboa

email: croca@fc.ul.pt

Resumo: No início do século XX a comunidade científica deparou-se com situações experimentais bastante estranhas. Experiências extremamente sofisticadas indicavam que os entes quânticos tinham propriedades muito inesperadas. Por um lado tinham de ser localizados, quer dizer ter um carácter pontual, por outro tinham que possuir simultaneamente atributos não pontuais de extensão. Resumindo, verificou-se que os sistemas quânticos tinham que possuir, ao mesmo tempo, propriedades locais, características dos corpúsculos e propriedades de extensão, atributo das ondas. Para integrar esta aparente contradição Niels Bohr, por razões que ainda hoje nos escapam, em vez de procurar uma explicação racional e causal, vai propor uma interpretação tipo idealista que nega a existência da realidade objectiva. Após apresentar, em traços gerais, esta visão indeterminista iremos ver como é possível, usando do critério da razão, explicar os fenómenos quânticos sem qualquer necessidade de negar a existência da realidade objectiva. Pela simples utilização da rasoura de Occam torna-se possível conciliar o dualismo onda-corpúsculo, apanágio dos sistemas quânticos, num quadro conceptual local e causal. Esta síntese, que recupera a realidade objectiva, é não só extremamente intuitiva e racional como também é dotada de uma grande beleza estética conceptual.

1 – O PROBLEMA

Experiências extremamente rigorosas, realizadas no principio do século XX levaram, sem qualquer sombra de dúvidas, à conclusão que os entes quânticos, quer dizer, as moléculas, os átomos, os electrões e a luz, tinham propriedades aparentemente contraditórias. Essas experiências mostravam que, por exemplo, o electrão, considerado até então como um corpúsculo, um sistema perfeitamente localizado, tinha também características de extensão. Isto porque em certas experiências o electrão dava origem a fenómenos interferenciais que, como sabemos, constituem uma das características básicas das ondas. Por outro lado, também surgiram problemas no domínio dos fenómenos que envolviam a luz. A luz era então considerada, como um acidente, quer dizer, como um fenómeno de natureza puramente ondulatório. Ora, certas experiências, relacionadas sobretudo com o chamado efeito fotoeléctrico, mostraram que a luz devia ser constituída por grãos, por corpúsculos, perfeitamente localizados. As conclusões a tirar destas experiências é de que por um lado os entes quânticos têm que ser localizados e por outro ser extensos.

Para melhor podemos abarcar a importância e complexidade do problema enfrentado pelos físicos da época iremos estudar, com um certo pormenor, uma experiência que desempenhou e continua a desempenhar um papel extremamente importante nos fundamentos da física quântica. Isto deve-se ao facto desta experiência evidenciar claramente o cerne do problema em questão. Trata-se da experiência das duas fendas ou dos dois orifícios.

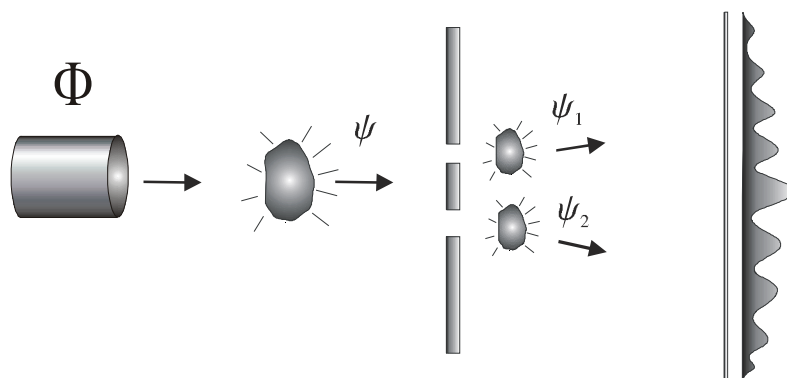


Fig.1 – Experiência das duas fendas

Esta experiência, esquematizada na Fig.1, consta essencialmente de uma fonte de partículas quânticas F , de tal modo arranjada que emite uma e uma só partícula de cada vez, de um anteparo, colocado à frente da fonte, onde estão realizados dois orifícios e de um alvo preparado para detectar a chegada das partículas. Estas experiências têm sido realizadas praticamente com todas as partículas quânticas, desde átomos aos fótons. Neste caso, para precisar a situação, vamos supor que se trata de uma fonte de electrões. Esta fonte emite partículas de tal modo que no dispositivo experimental apenas se encontra um electrão de cada vez. Está assim excluída, à priori, qualquer possibilidade de se encontrarem dois ou mais electrões simultaneamente no dispositivo experimental.

O nosso propósito agora consiste em prever a distribuição da posição dos impactos dos electrões que, ao fim de um certo tempo, chegam ao alvo detector.

O electrão é emitido pela fonte e no seu percurso vai encontrar o anteparo com os dois orifícios. Os casos que podem ocorrer são os seguintes:

O electrão bate no anteparo e é absorvido. Esta situação é irrelevante para a nossa previsão uma vez que os electrões não têm qualquer possibilidade de chegar ao alvo detector.

O electrão vai atravessar os buracos. Neste caso irá passar pelo orifício de cima ou pelo de baixo. Esta hipótese pode perfeitamente ser submetida ao veredicto da experiência. Para tal, basta colocar precisamente à frente de cada um dos orifícios um detector de electrões. Verifica-se que umas vezes o electrão é detectado em cima outras em baixo. Nunca acontece que os dois detectores sejam activados simultaneamente. Isto pela razão óbvia de que, em cada instante, no dispositivo experimental só se encontra um electrão de cada vez. Portanto, a conclusão, aparentemente razoável, a tirar desta experiência é

de que o electrão umas vezes passa pelo orifício de cima outras vezes pelo de baixo. A ser verdadeira esta conclusão, então, no alvo detector, devemos esperar a chegada dos electrões provenientes umas vezes de um orifício outras de outro. Quer dizer, o resultado previsto será o mesmo se umas vezes a experiência for realizada com o orifício de cima tapado e outras vezes o de baixo, estando apenas, em cada instante, um buraco aberto. Nestas condições, a repartição das posições dos impactos dos electrões, no alvo detector, ao fim de certo tempo, será a soma das duas distribuições dos electrões provenientes de cada um dos buracos. A distribuição da chegada dos electrões provenientes de um orifício é uma distribuição normal continua com a forma de um sino, também chamada gaussiana. Isto, como era de esperar, significa que os electrões se concentram sobretudo na zona centrada no orifício, indo-se esbatendo progressivamente à medida que se afastam dela. Assim, o resultado esperado deve ser a soma de duas curvas normais, dando origem a uma curva também continua tipo sino. No entanto as experiências mostram, sem qualquer margem para dúvidas, que a repartição de chegada dos electrões no alvo detector, longe de ser uma curva com a forma de um sino é, pelo contrário, uma distribuição interferencial, com máximos e mínimos. Ora, como sabemos, as interferências resultam da sobreposição de pelo menos duas ondas. Portanto a conclusão a tirar é de que algo, proveniente dos dois orifícios, chegou ao alvo detector. O electrão, o quer que esta entidade quântica seja, teve, de certo modo, de passar simultaneamente pelos dois buracos e por conseguinte deve ser uma onda.

Como se vê estamos perante um grave problema!

A primeira experiência com os dois detectores colocados à frente dos orifícios mostra que o electrão passou por um orifício ou pelo outro.

A observação da distribuição interferencial, dos electrões ao alvo detector, mostra que o electrão teve, de qualquer modo, de passar pelos dois orifícios simultaneamente.

Assim, essa estranha entidade quântica, a que nós chamamos electrão, tem, na verdade, um comportamento aparentemente muito bizarro: Tem que passar por um orifício ou pelo outro e deve, ao mesmo tempo, passar por um ou pelo outro.

Em resumo, a partir desta experiência somos levados a concluir que as partículas quânticas devem passar simultaneamente por:

1 – um orifício **ou** pelo outro.

2 – um orifício **e** pelo outro.

A questão que agora se coloca é de saber como será possível conciliar estas duas afirmações aparentemente contraditórias num todo coerente.

2 – SOLUÇÃO INDETERMINISTA PROPOSTA POR NIELS BOHR

Para conciliar as conclusões anteriores, que se afiguram como contraditórias, Niels Bohr, em vez de procurar uma explicação natural, causal e intuitiva, vai escolher uma solução que nega a existência de uma realidade objectiva. Vai então afirmar que, antes da medida antes da observação, os sistemas quânticos não são dotados de uma

existência real e objectiva. Tudo o que temos, segundo ele, é apenas um conjunto de potencialidades ou probabilidades que se podem eventualmente tornar reais pelo acto de medida. Neste caso concreto, da experiência dos dois orifícios, teremos, de acordo com Niels Bohr, a seguinte situação:

O electrão, como aliás qualquer ente quântico não é onda nem corpúsculo. O electrão é sim um sistema que tem atributos de uma e de outra sendo portanto potencialmente onda e potencialmente corpúsculo, ora se manifestando um aspecto ora o outro. Nunca as duas propriedades se podendo manifestar simultaneamente Assim, ao chegar ao anteparo com os dois orifícios, atrás dos quais se encontram detectores, vai manifestar o seu aspecto corpuscular local em detrimento do seu carácter potencial ondulatório de extensão. Neste caso vai passar por um ou por outro orifício materializando-se no detector correspondente. Se estes detectores forem removidos, o aspecto local não tem qualquer hipótese de se tornar real, mantendo então o electrão o seu carácter potencial de onda. Assim, sendo potencialmente extenso, o electrão vai passar potencialmente pelos dois orifícios ao mesmo tempo dando origem a duas ondas potenciais que se vão sobrepor. Desta sobreposição das ondas vão surgir as interferências.

Para conciliar o dualismo característico dos sistemas quânticos que devem ser extensos e localizados Bohr inventou, como vimos, uma solução extremamente artificiosa que nega a existência de uma realidade objectiva.

A uma sã mente racionalista esta estranha explicação, de cariz idealista, apresentada por Bohr, pode parecer como um mero delírio especulativo destituído de qualquer sentido. No entanto, este físico foi capaz de construir um formalismo matemático coerente capaz de expressar perfeitamente o seu modo de pensar. Este formalismo baseia-se na chamada análise de Fourier.

Joseph Fourier, um engenheiro dos tempos de Napoleão, para resolver o problema da propagação do calor, descobriu que era possível representar qualquer função razoavelmente bem comportada em termos de ondas planas harmónicas. Quer dizer, qualquer função pode ser escrita como uma combinação, uma soma, de senos e cosenos. Assim qualquer estrutura, uma partícula por exemplo, pode ser descrita a partir de uma composição de ondas planas harmónicas como se indica na Fig.2.

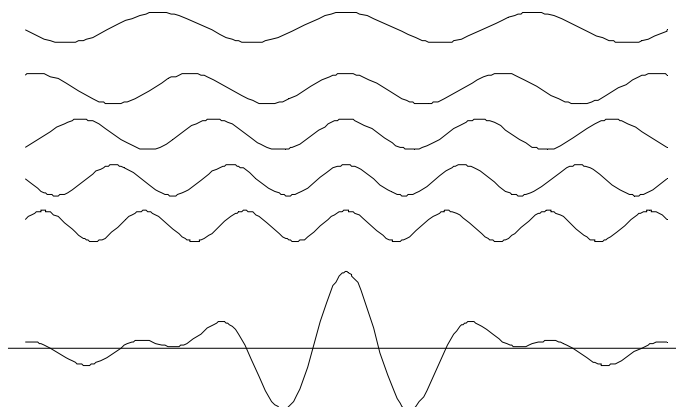


Fig.2 – Soma de ondas planas harmónicas.

Na Fig.2 estão representadas apenas cinco ondas harmónicas e a sua soma. Como se pode observar, mesmo com poucas ondas, é possível construir estruturas razoavelmente localizadas. Pela adição adequada de ondas harmónicas, que são infinitas quer no espaço quer no tempo, torna-se possível descrever a evolução espaço-temporal de qualquer sistema quântico.

Para Fourier a sua análise constituía um simples instrumento matemático extremamente útil, é certo, mas no entanto destituído de qualquer conteúdo físico. É sabido que as ondas físicas reais são finitas, tem um início e, necessariamente, um fim. Niels Bohr, pelo contrário, de simples regra matemática de composição abstracta de funções, vai promover esta análise ao estatuto de uma ontologia, afirmando que tudo é constituído por ondas infinitas que existem em todo o espaço e todo o tempo. Esta atitude corresponde, de certo modo, a um regresso disfarçado ao paradigma platónico da circularidade.

Platão para conciliar o devir com a permanência vai considerar que o movimento perfeito só se encontra na esfera. Isto porque ao rodar a esfera mantém inalterada a sua forma e portanto, apesar de em movimento, permanece sempre igual a si própria. Este paradigma parte do princípio de que o único movimento perfeito é o movimento circular. Assim, no céu, onde reina a perfeição, todos os corpos devem descrever movimentos circulares e uniformes. Se as órbitas dos astros errantes, os planetas, não parecem circulares, isso deve ser uma ilusão dos nossos sentidos pois que elas devem, de acordo com aquele princípio de perfeição, resultar de uma combinação judiciosa de movimentos circulares perfeitos. Os sucessores de Platão lançaram-se a esta gigantesca tarefa da explicação da harmonia e perfeição dos céus em termos de movimentos circulares. Este esforço, que dura vários séculos, culmina com a obra de Cláudio Ptolomeu *O Almagesto*, quer dizer, *O Grande Livro*. Nesta cosmologia os corpos celestes descrevem, desde sempre e para sempre, movimentos circulares perfeitos. Ora a projecção de um corpo celeste, descrevendo um movimento circular uniforme, sobre um eixo, como se pode ver na Fig.3, dá origem a uma oscilação, a uma onda. Esta onda designa-se por harmónica uma vez que resulta de um movimento perfeito e harmónico que não teve começo nem terá fim.

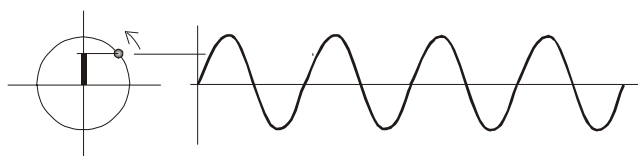


Fig.3 – A projecção, sobre o eixo vertical, dum ponto descrevendo um movimento circular é uma onda harmónica.

Um corolário imediato do paradigma borheano, onde o primado é dado as ondas harmónicas, infinitas no espaço e no tempo, é que a separabilidade e individualidade deixam de fazer qualquer sentido. Esta consequência resulta do facto de que dois sistemas relativamente localizados, como se pode ver na Fig.4, são constituídos, neste paradigma, pela soma de um número muito grande de ondas harmónicas infinitas.

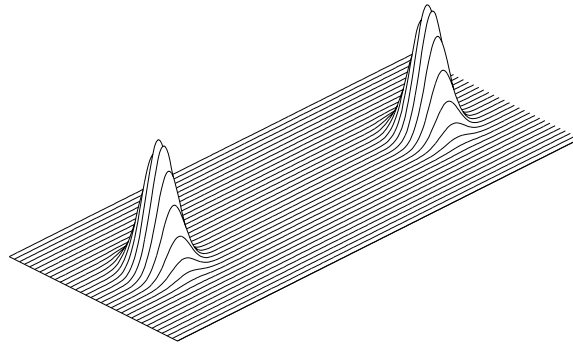


Fig.4 – A soma de um número muito grande de ondas harmónicas dá origem a duas partículas.

À primeira vista poderia parecer que as duas partículas são independentes. No entanto como elas são constituídas pelas mesmas ondas esta separabilidade é apenas ilusória. De facto, trata-se da mesma entidade. Um conjunto de ondas, que devido à sua sobreposição, vão interferir. Da interferência, de todas estas ondas constituintes, resultam apenas duas regiões não nulas. Em todo o restante espaço o resultado da sobreposição das ondas é nulo. Qualquer modificação numa partícula implica, necessariamente, uma modificação na outra. Consideremos o caso simples em que a partícula da direita permanece na mesma posição e a da esquerda se aproxima, como está indicado na Fig.5.

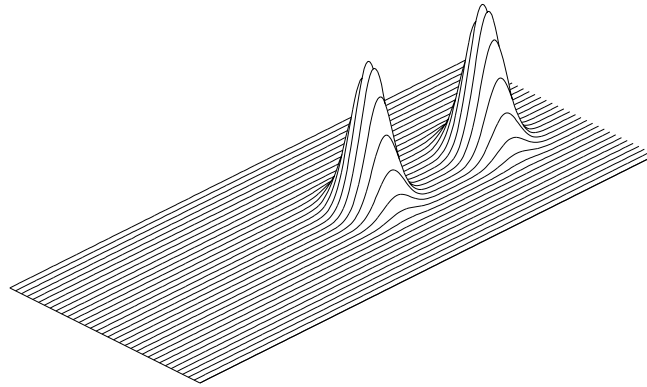


Fig.5 – Uma partícula permanece na mesma posição enquanto a outra se aproxima.

Em termos de um paradigma de ondas, que existem em todo o espaço e todo o tempo, o movimento de uma partícula significa apenas que as ondas que anteriormente interferiam construtivamente numa dada região, vão agora interferir positivamente noutra zona do espaço. Para que tal possa acontecer torna-se necessário modificar as relações de fase e as amplitudes das ondas, de tal modo que a interferência construtiva ocorra agora na região da segunda partícula, que se manteve no mesmo sítio, e também na nova posição da segunda partícula. Assim, dentro deste paradigma, o movimento e a separabilidade dos sistemas não são mais que uma mera ilusão dos nossos sentidos. Dizer que uma partícula está simplesmente localizada numa dada região do espaço não está de acordo com os pressupostos de base. Sendo a partícula intrinsecamente

constituída por ondas harmónicas infinitas teremos de concluir que a partícula, nesta ontologia, é omnipresente ocupando assim todo o espaço e todo o tempo.

Surge agora uma nova questão! Se apenas as ondas harmónicas tem uma frequência e portanto uma energia bem definida qual será então a energia que uma dada partícula possui? Resultando uma partícula, necessariamente, da composição de muitas ondas harmónicas, cada uma com a sua energia, a partícula deve possuir então todo um conjunto de energias, tantas quanto as ondas que a constituírem. No entanto, quando se observa uma partícula ela possui uma energia bem definida. Segundo Bohr a conclusão a tirar é que, antes da medida, aquilo que existe é todo um conjunto de partículas potenciais, cada uma com uma energia perfeitamente definida mas sem qualquer realidade objectiva. A cada onda harmónica, infinita no espaço e no tempo, corresponde potencialmente uma partícula, dispersa por todo espaço e por todo o tempo. Quando se efectua a observação, pelo acto da medida, toda esta multiplicidade de partículas potenciais converge para uma única partícula real com uma energia bem definida. Assim, antes da medida, a partícula, de facto, não existe realmente. Tudo o que existe é um conjunto de potencialidades, de partículas potenciais, das quais uma delas pode eventualmente ser materializada pela observação.

Se as partículas, os electrões, os protões, os átomos, etc. não existem realmente antes de serem observadas então a natureza sendo constituída por estas partículas também não pode existir antes de ser observada. A Realidade, neste paradigma é assim, como vimos, criada pelo observador. Apresenta-se a seguir um exemplo que ilustra, de uma forma caricata, este ponto de vista.

Esta situação encontra-se ilustrada na figura seguinte, Fig.6, que representa o chamado cão quântico.

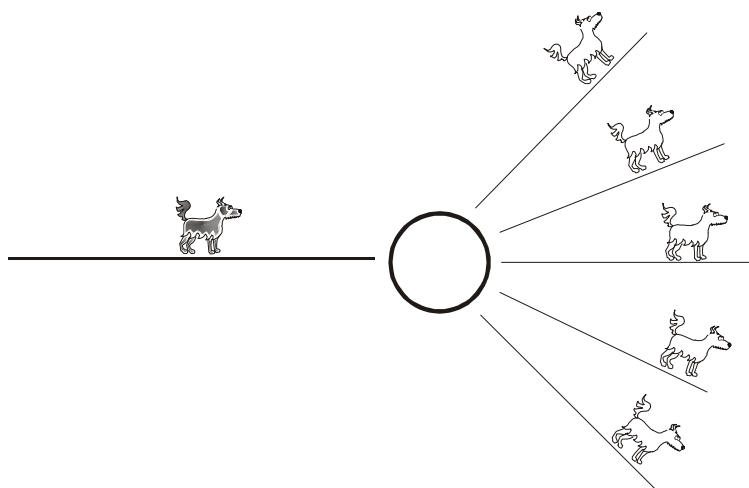


Fig. 6 – O cão quântico

Trata-se de um cão muito especial, um cão quântico, que ao seguir um certo percurso encontra uma rotunda de onde derivam cinco caminhos. Num universo dotado de realidade objectiva o cão poderia seguir por qualquer dos caminhos. No entanto, no universo indeterminista de Niels Bohr, o cão vai ter de seguir simultaneamente por todos os caminhos possíveis. Como nenhum cão real pode seguir por cinco caminhos ao

mesmo tempo, segue-se que o cão perde a sua realidade física objectiva e tornando-se assim num múltiplo cão potencial. Trata-se, na verdade, de um estranho cão quântico. Para garantir a realidade do cão tornava-se necessário dizer que ele seguia por um único dos cinco percursos possíveis. Neste caso estaríamos na mesma situação da experiência das duas fendas ao dizer electrão tinha passado por uma ou por outra fenda. Nestas condições teríamos de rejeitar o carácter extenso ondulatório dos sistemas quântico e, por conseguinte, não seria possível explicar o carácter extenso de que resultam as interferências observadas experimentalmente!

Se aceitarmos que o universo é descrito pela física indeterminista borheana, quer queiramos quer não, teremos de afirmar que o cão quântico segue potencialmente por todos os caminhos possíveis ao mesmo tempo.

Quando o cão real é detectado numa das vias, dá-se então o colapso de todo o sistema de existência potencial e todas as múltiplas potencialidades convergem para uma única. Antes da medida, antes da observação, o cão quântico encontrava-se potencialmente presente em todos os percursos possíveis. Ao realizar-se a medida todos os cinco cães potenciais se materializam instantaneamente num único cão real

Vários cientistas importantes opuseram-se, por questão de princípio, à visão indeterminista borheana pois que ela, como vimos, nega a realidade objectiva do mundo. Para evidenciar natureza estranha deste paradigma dedicaram-se a estudar situações de certa forma bizarras resultantes da utilização do modelo. Um destes casos, extremamente sugestivo, foi proposto por Schrödinger, um dos fundadores da mecânica quântica, trata-se do chamado gato de Schrödinger, ilustrada na Fig.7

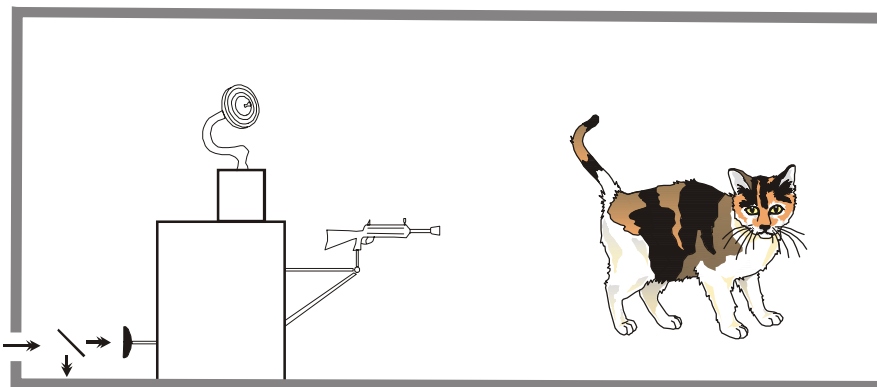


Fig.7 – Gato de Schrödinger

Esta experiência conceptual consta de uma caixa blindada onde se encontra um gato. Na caixa está praticado um orifício por onde pode entrar um e um só fotão. Este fotão, ao entrar, encontra um espelho semi-espelhado com a propriedade de reflectir ou transmitir o fotão com igual probabilidade. Se o fotão for reflectido vai ser absorvido pelas paredes da caixa e nada acontece. Se, por acaso, o fotão é transmitido vai encontrar pela frente um sensor que detecta a sua presença ao mesmo tempo que envia um sinal para o computador. Este computador vai actuar o sistema de pesquisa que localiza o gato. Uma vez localizado o alvo, a espingarda é apontada e em seguida dispara matando o gato. Como a caixa é blindada um observador colocado fora não tem qualquer possibilidade de saber se o tiro foi disparado ou não.

Consideremos o dispositivo experimental preparado, com o gato lá dentro, e vamos então iniciar a nossa experiência. Para tal injectamos um fóton pelo orifício da caixa. O nosso problema agora consiste em prever em que estado se encontra o gato, antes de abirmos a caixa blindada.

Um observador dotado de bom senso, alheio ao paradigma indeterminista borheano, diria que o fóton ao entrar tinha 50% de probabilidade de ser absorvido e 50% de activar ao detector. Se o fóton atravessasse o espelho semi-espelhado o detector seria activado e o gato seria morto. Se o fóton fosse reflectido nada aconteceria e o gato estaria vivo. Assim, o gato tinha 50% de probabilidade de estar vivo e 50% por cento de estar morto. Ao abrir a caixa, o observador, veria qual das duas hipóteses tinha ocorrido.

Um observador aceitando o paradigma indeterminista de Niels Bohr contaria a história de um modo completamente diferente. Diria que o fóton após entrar pelo orifício da caixa chegava ao espelho semi-espelhado onde era reflectido e transmitido potencialmente. Como nenhuma observação era feita, nenhum dos dois fótons potenciais poderia ser anulado. Assim ao fóton potencialmente reflectido corresponde o estado potencial de gato vivo enquanto que ao fóton potencialmente transmitido corresponde o estado potencial de gato morto. A conclusão a tirar, dentro deste paradigma indeterminista que nega a realidade objectiva, é que, antes de abrir a caixa, o gato está potencialmente vivo e potencialmente morto, com igual probabilidade para cada estado. Ao abrir a caixa o observador, pelo acto de medida, materializa uma das duas possibilidades. Nestas condições, o acto de decisão, sobre vida ou de morte do gato, em última análise, cabe ao observador. Embora nos custe a acreditar, dentro deste paradigma indeterminista, é o observador, ao tornar real, um dos estados potenciais, que dá vida ou morte ao gato!

A aceitação do indeterminismo quântico conduz-nos, como vimos, a situações deveras estranhas. No entanto a situação pode ainda tornar-se muito mais misteriosa. No caso do gato e do cão a transformação dos estados de existência potencial num único estado real deveu-se a uma interacção física mensurável, passível de registo directo e objectivo. Iremos agora ver um caso em que tal não acontece.

Trata-se de uma experiência apresentada por Renninger onde o colapso das múltiplas potencialidades, numa única, se dá sem que ocorra qualquer interacção física observável.

Esta experiência encontra-se esquematizada na Fig.8 onde se vê uma fonte de fótons, emitindo, um por um, como é de norma neste tipo de situações.

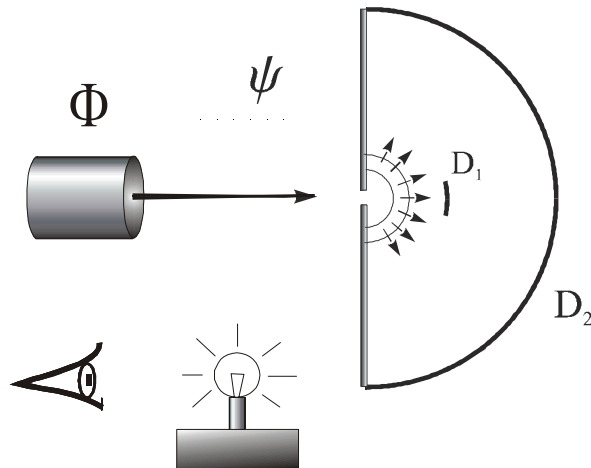


Fig.8 - Experiência de Renninger

No seu percurso o fóton encontra um anteparo circular com um orifício de pequeníssimas dimensões. Após atravessar o orifício o fóton vai manifestar o seu aspecto extenso dando origem a uma onda hemisférica progressiva. Esta onda no seu percurso encontra, ao fim do tempo t_1 , um pequeno detector D_1 onde o fóton poderá eventualmente ser detectado. O dispositivo encontra-se preparado de tal modo que se este detector for activado, pela chegada do fóton, um observador colocado fora do sistema observa uma luz acender. No caso do fóton não ser localizado, pelo pequeno detector, ele prosseguirá a sua marcha. Sendo, mais tarde, detectado no grande detector hemisférico D_2 colocado bastante longe do primeiro.

Antes da medida o fóton existe em dois estados potenciais correspondentes às duas hipóteses possíveis. Um estado potencial corresponde à possibilidade de ser detectado no detector pequeno o outro de ser detectado no detector gigante hemisférico. Ao atravessar o orifício o fóton transforma-se assim em dois fótons potenciais correspondentes aos trajectos possíveis.

Se o observador vê a luz acender é porque o fóton foi detectado pelo detector pequeno. Nestas condições, a possibilidade de ser detectado no detector grande imediatamente se transforma em zero. Os dois fótons potenciais, um correspondente à detecção no pequeno detector outro no grande, convergem num único estado. Neste caso, tal como nos anteriormente estudados, o colapso dos estados potenciais num único estado real deve-se a uma interacção física observável e mensurável.

Porém, se ao fim do tempo t_1 , o tempo necessário para o fóton chegar ao pequeno detector, a luz não acendeu concluímos que o fóton será, mais tarde, detectado no detector hemisférico gigante D_2 . Neste caso, a transformação dos múltiplos estados potenciais, num único estado real dá-se sem que tenha existido qualquer interacção física.

Como se constata, nesta medida muito especial, o colapso das múltiplas probabilidades deu-se, contrariamente com o que sucedia anteriormente, sem que houvesse qualquer interacção física mensurável. Se não houve qualquer interacção física então qual é a causa deste colapso, da transformação, dos múltiplos estados potenciais, num único estado real?

A resposta dada a esta questão pelos físicos indeterminista, que negam a existência de uma realidade objectiva, é que, em última instância, a redução das múltiplas potencialidades não é devida a uma mera interacção física mas sim obra da **consciência** do observador. O observador ao tomar consciência de que o detector pequeno não foi activado reduz as duas potencialidades a uma só realidade objectiva que corresponde à detecção posterior no detector hemisférico gigante.

Resumindo, segundo o paradigma indeterminista borheano, a transformação do conjunto dos múltiplos estados de existência potencial, desprovidos de qualquer realidade objectiva, num único estado real deve-se, em última análise, à **consciência** do observador.

Esta conclusão levou alguns físicos a afirmar que se o mundo tem uma realidade objectiva, isto deve-se inequivocamente ao facto de que existe uma

CONSCIÊNCIA UNIVERSAL – DEUS

que ao observar todas as múltiplas potencialidades de existência possíveis torna real aquela de que nós, simples mortais, nos damos conta. Nestas condições, **DEUS** é o único garante da Realidade objectiva do mundo!

3 – SOLUÇÃO RACIONAL

Como vimos, para explicar o facto dos sistemas quânticos possuírem um carácter extenso e local Niels Bohr e seus seguidores, ao romper com a causalidade e com a realidade objectiva, escolheram um caminho deveras estranho. Trata-se, na verdade, de um caminho, de certa forma, maravilhoso e misterioso, pleno de magia, onde os milagres fazem todo o sentido. Esta atitude tem algo, de certa forma, semelhante à dos povos das culturas primitivas que para resolverem os problemas, que se colocam no dia a dia, em vez de fazer uso da razão preferem invocar as potências divinas, forças misteriosas, energias astrais e similares. No entanto, a diferença essencial existente entre as duas atitudes reside principalmente no facto da mecânica quântica indeterminista ser uma teoria matematicamente consistente dotada de poder de previsão e de grande eficácia, contrariamente ao que sucede com as concepções primitivas de carácter magico e animista.

Iremos agora ver como é possível, fazendo uso da razão, elaborar um modelo causal capaz de integrar o dualismo onda corpúsculo num todo coerente. Este modelo toma como ponto de partida a existência de uma realidade objectiva independente do observador. Todo o modelo é elaborado sem haver qualquer necessidade de invocar, acções instantâneas, potências e outras entidades de natureza mais ou menos misteriosa ou mesmo recorrer a conceitos de origem divina.

O combate em defesa da causalidade começou logo no início da mecânica quântica. Uma plêiade de físicos, dos quais poderemos referir, entre outros, Einstein, de Broglie, Schrödinger e Max Planck, sempre se opuseram ao paradigma indeterminista borheano. Deste enorme esforço, o mais bem sucedido deve-se, sem dúvida, a de Broglie que foi capaz de elaborar uma primeira teoria linear causal consistente que serviu de base ao presente desenvolvimento. No entanto todos estes esforços, para repor a causalidade e individualidade, foram feitos dentro do paradigma não local e não temporal de Fourier. Precisamente, em virtude deste facto, todo este trabalho estava, de certo modo, inevitavelmente condenado, logo à partida, a um sucesso parcial.

Enquanto se aceitar, como ponto de partida, que só uma onda infinita tem uma frequência e portanto uma energia bem definida, não é possível conceber sinais finitos no tempo e no espaço com uma energia bem definida. Isto porque um sinal finito, no paradigma indeterminista, resulta necessariamente sempre de uma sobreposição de ondas harmónicas perfeitas, cada qual com a sua energia própria. Por esta razão não é possível conceber verdadeiros sistemas objectivos dotados de propriedades locais e possuindo individualidade própria.

Afirmar que qualquer sistema físico finito é constituído, em última análise, por ondas infinitas equivale simplesmente à rejeição da localidade e da individualidade.

Estes factos levam-nos a pensar que Niels Bohr procedeu com muita astúcia e habilidade ao promover o instrumento desenvolvido por Fourier de simples regra de composição de funções ao estatuto de uma ontologia. Com este passo conseguiu obter, de uma vez para todas, a não localização intrínseca, quer dizer, a omnipresença, dos sistemas físicos, arrastando directamente à rejeição da existência de uma realidade objectiva.

Agora, que estamos mais distanciados no tempo, podemos compreender e avaliar devidamente as dificuldades que enfrentaram todos aqueles que se esforçavam por repor o causalismo e a individualidade. Espartilhados, como estavam, por um paradigma não local e não temporal, de ondas harmónicas infinitas no espaço e no tempo, a construção

de uma verdadeira teoria causal local, que garanta a individualidade dos sistemas, resultava uma tarefa deveras difícil, para não dizer mesmo impossível.

Para se romper este ciclo vicioso torna-se necessário rejeitar, de uma vez por todas, a ontologia de Fourier e aceitar que um sinal, um impulso, finito pode, na verdade, possuir uma frequência e conseqüentemente uma energia bem definida.

Por mais estranho que possa parecer, os primeiros passos ao longo desta senda foram dados, não nos chamados, por muitos, altos domínios da física teórica, mas sim nos “simples” domínios das aplicações da física onde os investigadores são permanentemente confrontados com a realidade prática do dia a dia e por isso tem que ter os pés bem assentes na terra. Foi no domínio das ciências da Terra que a aventura começou. O geofísico, Jean Morlet, nos anos 80 do século XX, estava empenhado em desenvolver um processo que lhe permitisse prever com maior eficácia a localização de jazigos de petróleo. Por isso, como a análise não local de Fourier se mostrasse inadequada para tratar o problema em questão, desenvolveu um novo processo designado, mais tarde, por análise local em onduletas ou ondas finitas. Esta análise por ondas finitas constitui um domínio da matemática presentemente em desenvolvimento explosivo devido sobretudo à sua grande eficácia no tratamento de informação.

Uma vez dispendo de uma ferramenta que permite a análise local torna-se relativamente simples dar o passo seguinte. O passo seguinte consiste simplesmente em conceber, como natural, que um impulso, uma onda física real, pode ter, na verdade, uma frequência, e portanto, uma energia bem definida. De uma ontologia, a análise não local e não temporal, passa a ser um simples processo abstracto de composição de funções, mais ou menos adequado, desprovido, no entanto, de qualquer conteúdo intrínseco ontológico, tal como o seu criador, Joseph Fourier, o entendia.

Neste novo modelo causal e local o primado passa assim das ondas infinitas para ondas finitas de frequência bem definida. Uma destas ondas finitas, de frequência bem definida, também chamada onduleta de Morlet ou ainda gaussiana, está representada na Fig.9

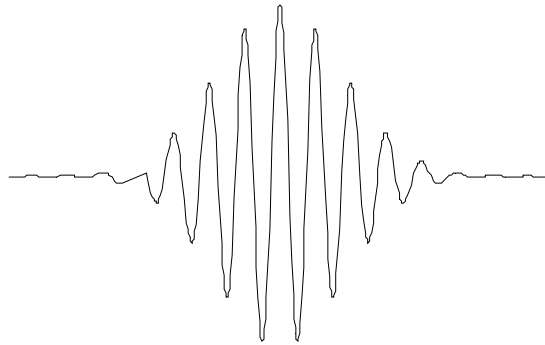


Fig.9 – Onduleta de Morlet ou gaussiana

As partículas e restantes sistemas podem ser agora representados por uma ou eventualmente por mais ondas finitas. Para melhor podermos comparar esta nova análise local em onduletas com a análise não local de Fourier vamos considerar a figura Fig.10. Nesta figura, o mesmo sinal original é composto pela soma quer de ondas finitas quer de ondas harmónicas infinitas.

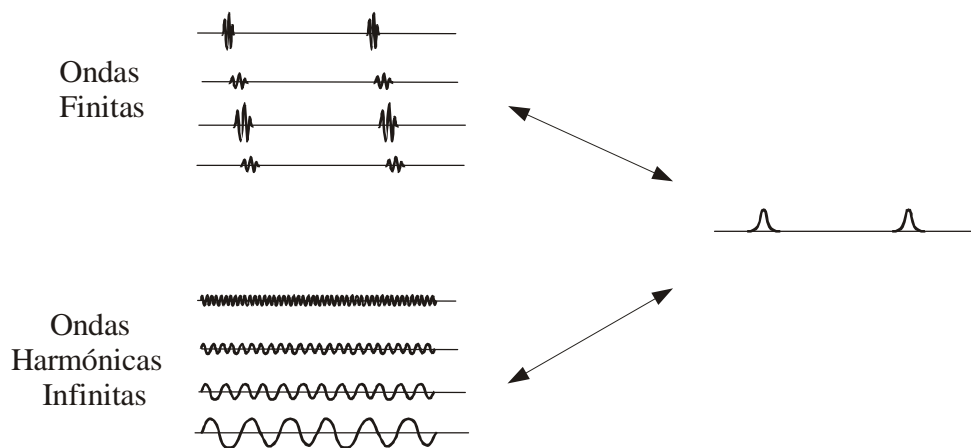


Fig.10 – Composição do mesmo sinal por ondas finitas e infinitas

A soma do primeiro grupo de ondas finitas dá origem à primeira estrutura. A segunda partícula, resultando da composição do segundo grupo de onduletas, é completamente independente da primeira.

No caso das ondas harmónicas elas, pelo simples facto de serem infinitas, constituem um todo único cuja soma dá origem a uma composição de que resultam as duas regiões de interferência não nula. Assim, uma modificação na posição duma partícula implica impreterivelmente uma modificação das ondas que a constituem. Como se trata do mesmo grupo de ondas que dá origem às duas partículas qualquer modificação numa implica necessariamente uma alteração na outra, ainda que permaneça na mesma posição.

Completamente diferente é a situação se as partículas forem descritas por grupos de ondas finitas diferentes. O facto da partícula da esquerda se aproximar ou afastar em nada afecta a outra. Apenas se torna necessário alterar o grupo de onduletas que formam a primeira partícula que é, como vimos, independente do segundo. Neste caso, da análise por ondas finitas, os sistemas podem conservar toda a sua individualidade própria. Quando são compostas por ondas harmónicas infinitas, dado que se trata do mesmo grupo de ondas, as duas partículas constituem, na verdade, a mesma entidade global una e indivisível. A sua individualidade aparente é apenas uma ilusão dos nossos sentidos.

Convém salientar que a análise finita por onduletas gaussianas contém, como caso particular, a análise infinita. Para tal basta deixar aumentar a dimensão da onda finita, que se pode tornar tão grande quanto queiramos, tornando-se, no limite, numa onda harmónica infinita.

Uma vez rompida a ontologia de Fourier, dos movimentos harmónicos eternos e perfeitos, torna-se relativamente simples elaborar um modelo de partícula quântica, cuja representação esquemática se pode ver na Fig.11



Fig.11 – Representação gráfica da partícula quântica

Neste modelo, causal e local, uma partícula quântica constitui um sistema deveras complexo de tal modo que não mais é possível caracterizá-la apenas pela posição. Esta partícula quântica é constituída por uma

onda extensa, no seio da qual se encontra uma região, uma espécie de núcleo, por vezes designada por singularidade, dado que à escala da onda associada, a sua dimensão é desprezável. Esta região particular, de pequeníssimas dimensões, também é designada, por vezes, por corpúsculo. É no corpúsculo que está concentrada praticamente toda a energia da partícula. Assim, uma partícula quântica é composta por uma região extensa, a onda de fraca energia e pelo corpúsculo, responsável pelos fenómenos de detecção usuais. A onda dotada de pouca energia guia, no entanto, o movimento do corpúsculo, através de efeitos não lineares, de tal modo que este segue preferencialmente nas regiões onde a onda é mais intensa. Como se constata, ao nível quântico, existe uma diferença significativa entre os conceitos de partícula e de corpúsculo. Estas palavras que eram sinónimas numa perspectiva clássica, passam a ter, ao nível quântico causal, significados inteiramente diferentes. Uma partícula é um sistema deveras complexo possuindo extensão e localização enquanto que um corpúsculo é apenas caracterizado pela sua posição,

Em certas condições experimentais torna-se possível isolar ondas desprovidas de qualquer corpúsculo. Estas ondas, sem região singular, dotadas de pouquíssima energia, também são conhecidas por ondas vazias (vazias de corpúsculo) ou por ondas teta. O inverso não é verdadeiro! Não é possível isolar a singularidade da sua onda guia. Se numa dada situação a onda guia for muito atenuada de tal modo que a sua existência, como onda, esteja em perigo então, nesse caso, a singularidade cede-lhe a energia necessária à sua sobrevivência.

Com este modelo de partícula a experiência das duas fendas tem uma explicação extremamente fácil e intuitiva, tal como se pode observar na Fig.12.

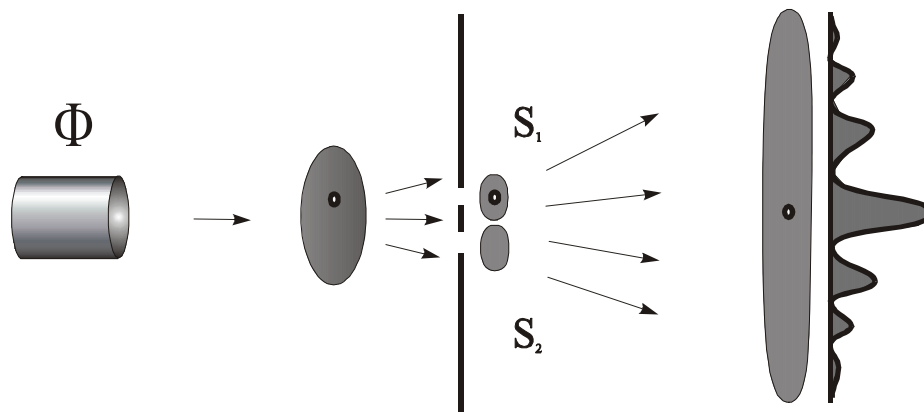


Fig.12 – Descrição causal e real da experiência das duas fendas

A partícula quântica emitida pela fonte, formada pela onda extensa mas finita, transporta o corpúsculo extremamente localizado. Ao chegar ao anteparo acontece que a

onda como é extensa passa pelos dois orifícios ao mesmo tempo. A singularidade, de pequeníssimas dimensões, passa por um ou pelo outro seguindo incorporada numa ou noutra onda. Estas duas ondas no seu percurso vão expandir-se indo sobrepor-se dando origem, no alvo detector, a uma onda total. Esta onda total, resultando da soma das duas ondas tem, como se sabe, uma forma interferencial. É esta onda total que vai guiar agora, preferencialmente, o corpúsculo para as zonas onde a sua intensidade é maior. Assim, um corpúsculo chega ao detector dando origem a um ponto localizado nas regiões de maior probabilidade. À medida que o tempo decorre a distribuição destes impactos começa a ganhar a forma dando origem à repartição interferencial. Ao fim de um certo tempo esta figura interferencial torna-se estável e perfeitamente visível.

Como vimos, a aparente contradição com que se deparavam os físicos no primeiro quartel do século XX de a partícula quântica ter que passar por:

1 – um orifício **ou** pelo outro

2 – um orifício **e** pelo outro

foi satisfatoriamente resolvida de um modo simples e racional.

Esta explicação bela e intuitiva pode resumir-se do seguinte modo:

1 – a singularidade passa por --- um orifício **ou** pelo outro

2 – a onda passa por ----- um orifício **e** pelo outro.

Armados destas ferramentas conceptuais torna-se agora possível proceder a uma síntese global, coerente e objectiva da física clássica e da física quântica. Nesta síntese, como fizemos referência, assume-se que a realidade é una e existe independentemente do observador. Naturalmente que existe a noção de que o observador interactua com essa mesma natureza, de que faz parte, podendo eventualmente modifica-la em maior ou menor grau. Assim a física clássica e a física quântica correspondem apenas a níveis diferentes de descrição, a escalas diversas de observação, da mesma realidade.

Ao nível de descrição da física clássica os sistemas locais, os corpúsculos, e os sistemas extensos, como por exemplo as ondas, são entendidos como realidades independentes. Nestas condições, são, naturalmente, descritos por equações diferentes.

À escala quântica esta dicotomia do local e do extenso perde todo o sentido. A localização e a extensão são integradas num todo. Esta entidade única onda-corpúsculo é agora descrita por uma única equação.

Nestas condições podemos dizer que a física clássica deriva, é um caso particular, da descrição quântica quando a unidade onda-corpúsculo é rompida, passando estas propriedades dos sistemas a ser tratadas como realidades independentes. A equação fundamental não-linear, à escala quântica, dá origem a duas equações, uma para os corpúsculos, outra para as ondas, cujas soluções são então tratadas como realidades independentes. Simetricamente, podemos dizer que a física quântica mais não é que uma extensão, uma generalização, da física clássica onde o aspecto extenso e local passam a ser considerados como um todo. Assim, por fusão das duas equações fundamentais da física clássica é possível obter a equação não-linear que descreve os fenómenos à escala quântica.

Esta síntese global entre os dois níveis, ou escalas, de descrição da realidade objectiva encontra-se esquematizada na Fig.12.

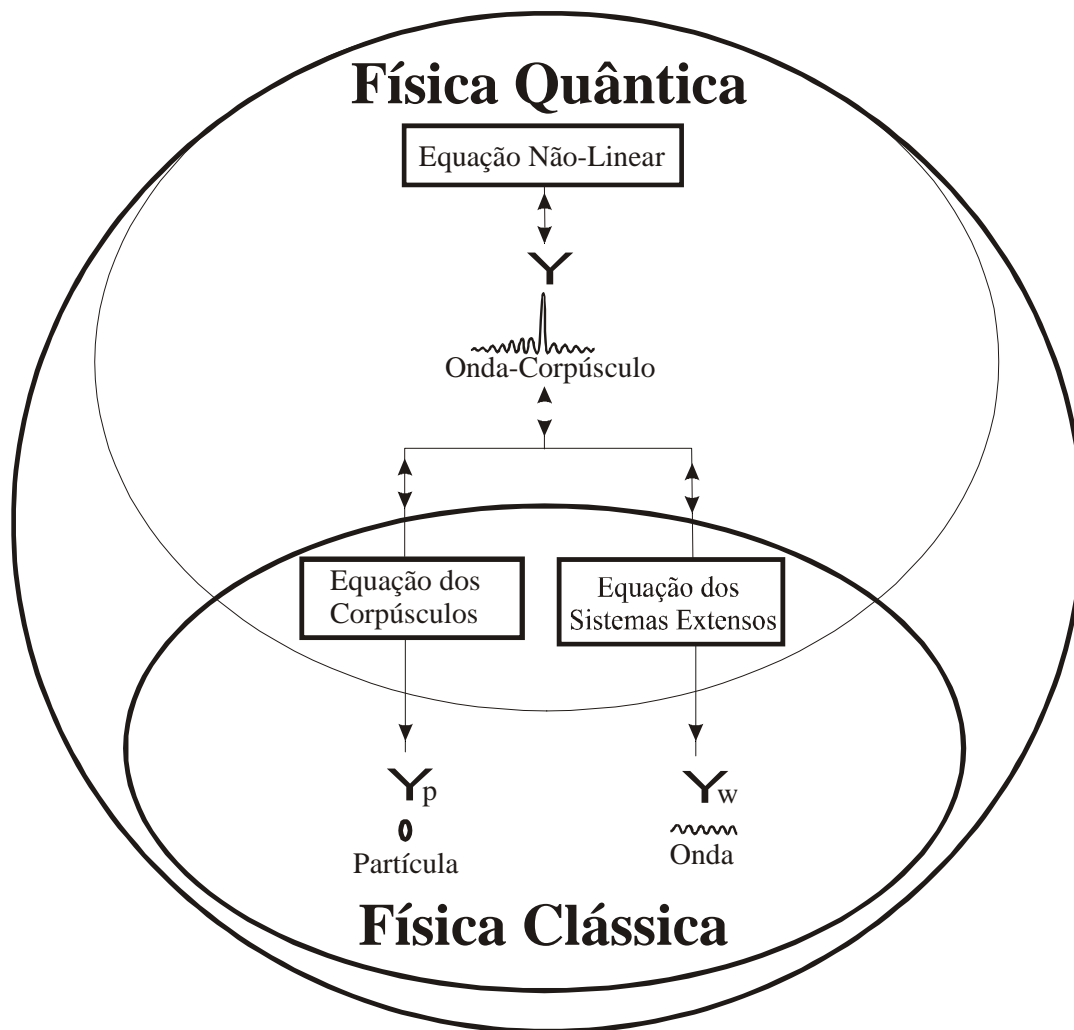


Fig.12 – Síntese global dos níveis de descrição quântico e clássico

A realidade é uma e objectiva. Aquilo que varia é simplesmente o modo como descrevemos essa mesma realidade. Ao nível quântico, à escala quântica, não é possível separar o carácter extenso do local enquanto que à escala clássica torna-se muito mais cómodo tratar estas características dos sistemas como propriedades independentes.

Neste paradigma causal as experiências conceptuais antes consideradas, do gato de Schrödinger, do cão quântico e da experiência negativa de Renninger deixam de oferecer qualquer problema sendo removidos todos os problemas e paradoxos. As respostas dadas às questões levantadas são precisamente aquelas que correspondem à observação comum e ao bom senso.

4 – PROVAS A FAVOR DA EXPLICAÇÃO RACIONAL

Iremos agora referir à evidência experimental que mostra que o desenvolvimento do paradigma causal e local não só permitiu a reintrodução de uma sã racionalidade na física como possui ainda uma maior capacidade explicativa da fenomenologia quântica. Outra vantagem, não menos importante, desta nova física está relacionada com o facto de que agora, neste paradigma causal, já não existem limites de princípio para a possibilidade humana de entender a Realidade. As barreiras estabelecidas, pelo velho paradigma quântica indeterminista foram removidas e o espírito humano encontra-se, uma vez mais, livre para enfrentar os desafios e poder assim lançar-se à exploração dos novos universos que se abrem ao conhecimento. A mecânica quântica borheana teve a ousadia, à semelhança doutros credos de cariz religioso, de estabelecer fronteiras intransponíveis para o intelecto humano. Constata-se agora, afinal, que tais barreiras são meramente circunstanciais tornando-se, por conseguinte, possível continuar a aventura da exploração científica e intelectual.

Esta conclusão é perfeitamente natural, e resulta da aplicação do simples bom senso. Como sabemos, a mecânica quântica ortodoxa indeterminista, tal como qualquer outra teoria, é acima de tudo uma construção humana fruto de uma certa conjuntura histórica. Sendo elaborada a partir de um certo universo teórico e experimental datado no tempo. Nestas condições, mais tarde ou mais cedo, os seus limites de validade teriam de ser encontrados.

As pseudo barreiras ao conhecimento, introduzidas pela mecânica quântica ortodoxa, estão relacionadas sobretudo com o princípio de indeterminação. Este princípio é definido matematicamente pelas relações de Heisenberg que constituem um dos pilares fundamentais da teoria indeterminista. Na verdade toda a sua estrutura conceptual assenta sobre o princípio de indeterminação. Ele afirma que não é possível prever simultaneamente o resultado da medida de duas grandezas conjugadas, como por exemplo, a posição e a velocidade de uma partícula. Quanto melhor é o conhecimento da posição de uma partícula tanto pior se conhece a sua velocidade e vice-versa.

A evidência experimental acerca dos limites reais da teoria indeterminista surgiu no domínio da observação microscópica. As relações de Heisenberg afirmam que não é

possível prever simultaneamente a posição e a velocidade de uma partícula com um erro inferior a um certo valor. Ora, observações efectuadas com super-microscópios, desenvolvidos recentemente, mostram que na verdade é possível ir muito para além dos limites estabelecidos pelas relações de Heisenberg. A principal característica destes super-microscópios resulta do facto de terem uma resolução muito superior aos microscópios comuns também por vezes designados por microscópios de Fourier.

A expressão matemática das relações de Heisenberg resulta directamente da composição das ondas harmónicas infinitas de Fourier. Quanto menor for a região onde se pode localizar a partícula mais ondas teremos que incluir na composição. Como a cada onda corresponde uma velocidade bem definida segue-se que aumentando o número de ondas aumentam também as velocidades potenciais da a partícula. Se por exemplo queremos conhecer a velocidade sem qualquer erro então a partícula terá que ser representada por uma única onda harmónica infinita. Neste caso a partícula ocupa potencialmente todo o espaço, o que, dito por outras palavras, significa que nada sabemos sobre a sua posição.

Numa abordagem causal toda esta problemática é completamente modificada. A utilização das ondas finitas em substituição das ondas infinitas de Fourier permite estabelecer umas relações de incerteza gerais. Estas novas relações de incerteza, mais gerais, incluem, do ponto de vista matemático, as relações de Heisenberg como um simples caso particular. Contrariamente às relações de indeterminação estas relações causais de incerteza traduzem apenas uma mera impossibilidade circunstancial, inerente a qualquer medida concreta. Numa medida física real e concreta os erros resultam, em ultima análise, dos instrumentos usados na determinação das grandezas envolvidas. Uma melhoria dos instrumentos de medida pode eventualmente melhorar a previsão dos resultados. Neste contexto a previsão dos erros das medidas, da posição e da velocidade de uma partícula, efectuadas com os super-microscópios, não sendo explicadas pelas relações de indeterminação de Heisenberg, são naturalmente integradas no quadro conceptual da mecânica quântica causal e por conseguinte descritas matematicamente pelas fórmulas causais de incerteza.

Bibliografia

- J. Andrade e Silva e G. Lochak, *Quanta Grãos e Campos*, Instituto de Novas Profissões, Lisboa.
- F. Selleri, *Paradoxos e Realidade*, Editorial Fragmentos, Lisboa, 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, John Wiley & Sons, New York, 2002
- J.R. Croca, *Towards a Nonlinear Quantum Physics*, World Scientific, London, 2003