

O ESTRANHO UNIVERSO DA FÍSICA QUÂNTICA

Escola Naval

Lição de Abertura do Ano Académico 2004-2005

JR Croca

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer o gentil e honroso convite, que me foi feito pelo Sr. Almirante Comandante da Escola Naval, para proferir a Lição de Abertura do Ano Académico 2004-2005. Por outro lado, não quero deixar de referir que desde o ano de 1987-88 que me encontro a dar aulas na Escola Naval, ao abrigo do Convénio com a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, sempre encontrei aqui um ambiente acolhedor e motivador onde a competência e a dedicação imperam. Por último não queria deixar de exprimir o meu reconhecimento aos Alunos da Escola Naval pois que, apesar de todas as dificuldades, como a falta de tempo e outras inerentes às características especiais do seu curso, sempre conseguiram, com sucesso, ultrapassar todos os obstáculos devido ao seu grande entusiasmo e dedicação ao conhecimento.

1. INTRODUÇÃO

Nos fins do século XIX a física clássica, quer dizer: a mecânica newtoniana, o electromagnetismo de Maxwell e a termodinâmica conseguiam explicar praticamente toda a fenomenologia natural. Um dos mais importantes físicos de então, Lorde Kelvin, afirmou que segundo ele o edifício da Ciência estava completo. Tudo o que restava fazer aos futuros físicos seria apenas relativa aos aperfeiçoamentos e desenvolvimentos das suas aplicações técnicas. Neste panorama edílico apenas via duas pequenas nuvens negras. Uma destas nuvens negras era constituída pelo resultado dito negativo da experiência de Michelson e Morley, a segunda, relacionada com o problema do corpo negro de que resultou a introdução da constante de Planck. Kelvin acreditava que os avanços posteriores da ciência haveriam de varrer do céu completamente estas nuvens. Esta previsão revelou-se totalmente errada! Estas nuvens engrossaram de tal modo, provocando tal tempestade, que todo o edifício da física clássica foi posto em causa. De uma destas nuvens saiu a teoria da relatividade da outra a física quântica.

No que se segue trataremos apenas da física quântica, da sua estranha forma de olhar para o mundo e da possibilidade actual da sua superação.

Até ao advento da física quântica, que ocorreu no primeiro quartel do século XX, a comunidade científica, e as pessoas de um modo geral, acreditavam na causalidade e,

portanto, na realidade objectiva da Natureza. Por outras palavras, admitia-se que o planeta Urano, por exemplo, existia muito antes de ter sido descoberto em 1781 pelo grande astrónomo William Herschel.

Após a aceitação do paradigma borheano para interpretação da física quântica, no famoso Congresso Internacional Solvay de 1927, o modo habitual de pensar, herdeiro da tradição grega, onde cada acontecimento tem sempre necessariamente uma causa, foi drasticamente modificado. A causalidade é considerada obsoleta e a realidade objectiva é então negada.

2. O PROBLEMA

Vejam, de um modo breve, algumas das razões que levaram à negação da causalidade. Este problema está directamente relacionado com a questão do dualismo onda-corpúsculo característico dos sistemas quânticos.

Para tornar mais clara a situação consideremos a seguinte experiência, esquematizada na Fig.1, onde uma metralhadora está a disparar projecteis macroscópicos a um ritmo constante.

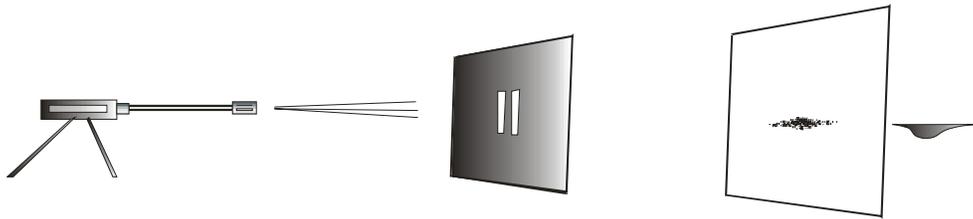


Fig.1 – Experiência das duas fendas com projecteis macroscópicos. Uma fonte de projecteis, uma metralhadora, emite a um ritmo constante. À frente está colocado um anteparo com duas fendas. Um alvo detector regista a chegada dos projecteis.

À frente desta fonte de projecteis encontra-se um anteparo com dois orifícios iguais O_1 e O_2 , por onde as balas podem passar. Mais à frente está um alvo onde os projecteis detectados. Suponhamos agora que um destes orifícios O_1 é tapado enquanto o outro permanece aberto. Nestas condições só os projecteis provenientes do orifício aberto podem chegar ao alvo detector. Assim, ao fim de um certo tempo, meia hora, por exemplo, iremos ter no alvo detector, uma distribuição de impactos de projecteis que tem a forma aproximada de um sino também designada em estatística por curva normal ou gaussiana, centrada na direcção do orifício. Se agora invertermos a situação, quer dizer, tapamos o orifício O_2 e destapamos o outro, e esperarmos o mesmo tempo iremos de igual modo obter uma distribuição gaussiana em tudo igual à anterior, só que agora ligeiramente deslocada.

A questão que agora se coloca é prever qual a distribuição dos impactos dos projecteis que se vai observar no alvo detector quando os dois orifícios estiverem abertos ao mesmo tempo durante o mesmo tempo. A resposta, clássica, que neste caso é a correcta, será

mais ou menos assim: Uma vez as balas passam pelo orifício O_1 e outras vezes pelo O_2 de forma que a distribuição dos impactos dos projecteis esperada será a soma das duas distribuições gaussianas individuais como indicado na figura.

Verificamos assim que o resultado da experiência, a distribuição dos impactos das balas no alvo detector, é independente do facto de fazermos a experiência com os dois orifícios destapados simultaneamente, ou abertos alternadamente. Nestas condições, a partir dos resultados experimentais, chegamos à conclusão que se trata de um fenómeno local ou corpuscular. Assim, a partir da não modificação da distribuição dos impactos observada, consoante os orifícios estão destapados simultaneamente ou abertos alternadamente, concluímos que as entidades emitidas pela fonte, as balas, têm o atributos de localidade ou de corpúsculos.

Consideremos agora uma outra situação clássica, de certo modo semelhante à anterior, indicada na Fig.2. Nesta figura está representada uma tina com água, que inicialmente está em repouso. Uma espécie de bóia, colocada na origem, devido à sua agitação produz uma onda circular que se vai propagando na superfície da água. Quando encontra o anteparo com duas fendas, esta onda inicial, vai dar origem a duas ondas que se vão propagar indo sobrepor-se dando origem a uma figura de interferências. Se agora taparmos uma das fendas a onda inicial, proveniente da fonte, ao chegar ao anteparo vai dar origem a uma única onda que se vai propagar sem dar origem a qualquer interferência. Isto, pela razão óbvia, de que para haver interferências é preciso pelo menos duas ondas.



Fig.2 – Interferência de duas ondas

Neste caso o resultado da experiência, a distribuição observada na região de detecção, depende do facto da experiência ser realizada com as duas fendas destapadas simultaneamente ou apenas com uma destapada alternadamente. No caso das duas fendas estarem destapadas simultaneamente observa-se uma figura de interferências devido à sobreposição das duas ondas. Se apenas uma fenda estiver aberta alternadamente não se observam interferências uma vez que só temos uma onda e para haver interferências precisamos de ter pelo menos duas ondas a sobrepor-se. Nestas condições a partir da distribuição observada, variável consoante a experiência é realizada com as duas fendas abertas simultaneamente ou não, concluímos que se trata de um fenómeno ondulatório.

Obtivemos deste modo um critério que nos permite distinguir, de um modo particularmente simples, se a entidade em estudo tem um carácter local ou corpuscular ou se, pelo contrário, possui um carácter extenso ondulatório.

Consideremos agora a mesma experiência das duas fendas, ou orifícios, realizada com entes quânticos. Experiências deste tipo tem sido feitas praticamente com quase todos os sistemas quânticos desde, fótons, electrões, neutrões, partículas alfa, até mesmo com sistemas bastante grandes como, por exemplo átomos de cálcio e outros. No nosso caso, e para fixar as ideias, suponhamos que se trata de uma fonte electrões emitido a um ritmo lento de modo que no dispositivo experimental apenas se encontra, de cada vez, um e um só electrão. Quando um dos orifícios se encontra tapado vamos observar no alvo detector a chegada de electrões segundo uma repartição gaussiana contínua centrada num ou no outro orifício consoante se encontra aberto ou fechado.

O problema que se coloca neste momento é de prever o que acontece quando a experiência é feita com os dois orifícios abertos simultaneamente. O resultado deste tipo de experiência, com sistemas quânticos, é sempre uma repartição interferencial como está indicado na Fig.3.

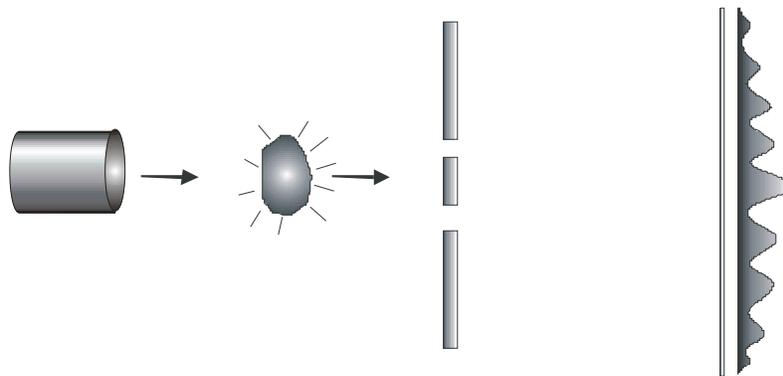


Fig.3 – Experiência das duas fendas realizada com electrões.

Como é possível explicar este resultado experimental?

Como no dispositivo experimental se encontra um e um só electrão de cada vez. Está, à priori, excluída a hipótese de, por vezes, termos dois electrões passando um por uma fenda e o outro pela outra. Assim, raciocinando classicamente, seríamos tentados a dizer que umas vezes o electrão passava por uma fenda outras vezes por outra. Neste caso não seria possível explicar a distribuição interferencial observada. Pois para que haja interferências, como vimos, é preciso que existam pelo menos duas ondas. Assim o que quer que seja a natureza desse ente quântico, que nós designamos por electrão, ele teve que passar, de qualquer modo, simultaneamente pelas duas fendas.

Assim esta experiência concreta conduz à conclusão de que essa estranha entidade quântica que é o electrão passou:

A - por uma fenda **ou** por outra (uma vez que só temos um electrão).

B - por uma fenda **e** por outra (pois deu origem a interferência).

A Figura 4 procura ilustrar, de uma forma caricata, esta estranha situação.

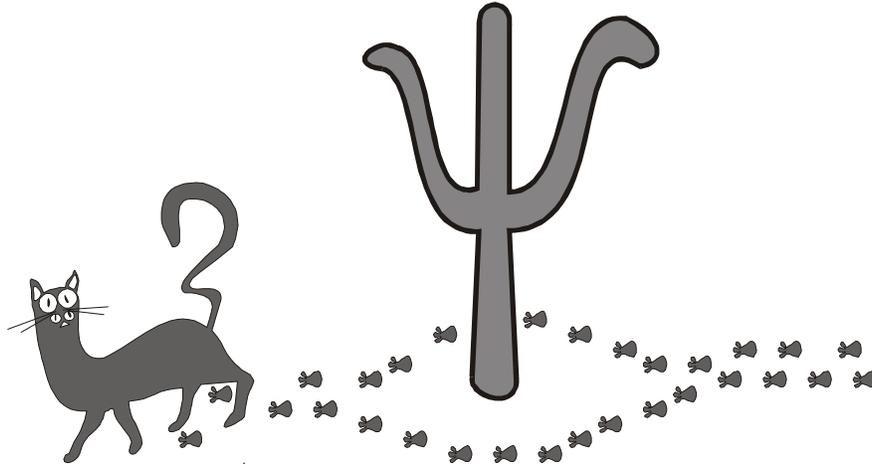


Fig.4 - Ilustração caricata do problema da dualidade onda-corpúsculo colocado pela experiência das duas fendas.

A figura realça 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.

Estamos, como se pode constatar, perante um impasse lógico! O electrão tem simultaneamente que passar e não passar pelas duas fendas. Como vamos resolver este problema?

Foi precisamente este complexo problema do dualismo onda-corpúsculo que os físicos, no início do século XX, tiveram que enfrentar.

Para resolver a contradição lógica do electrão ter que passar e não passar simultaneamente pelas duas fendas Niels Bohr vai propor uma explicação, que mais tarde se transforma no paradigma quântico, que vai negar a causalidade e a existência de uma realidade objectiva.

3. EXPLICAÇÃO INDETERMINISTA DE NIELS BOHR

Para melhor compreender a posição de Bohr vejamos, neste contexto, como ele explica então a experiência das duas fendas com entes quânticos.

Como está indicado na Fig.5 o electrão, emitido pela fonte, ao chegar ao anteparo com as duas fendas manifesta o seu carácter extenso de onda dando origem a dois electrões potenciais que vão passar simultaneamente pelas duas fendas.

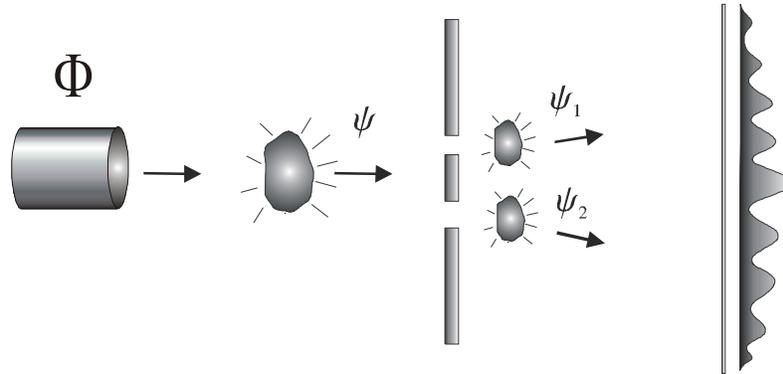


Fig.5 – Explicação da experiência das duas fendas dada por Niels Bohr.

No caso de colocarmos dois detectores, um à frente de cada fenda, acontece que um destes electrões potenciais vai-se materializar unicamente num deles. Nunca os dois detectores podem disparar simultaneamente. Isto pela óbvia razão de que temos apenas, em cada instante, um único electrão no dispositivo experimental. Se os dois detectores forem removidos nenhuma detecção poderá ser feita e os electrões potenciais extensos, ondas, vão avançar indo sobrepor-se dando origem a uma distribuição interferencial potencial que é materializada pelo detector.

Portanto, de acordo com Bohr e a sua escola, os sistemas quânticos são duais: Isto significa que tem propriedade quer de corpúsculo, de localização, quer de extensão de onda. Consoante a situação experimental ora se manifesta um aspecto ora o outro. Nunca os dois aspectos complementares, onda-corpúsculo, podem ser observados simultaneamente. No caso da experiência das duas fendas o electrão ao chegar ao anteparo com dois orifícios manifesta o seu carácter extenso ondulatório indo passar simultaneamente por eles dando assim origem a duas ondas potenciais, também ditas ondas de probabilidade. Estas duas ondas potenciais vão avançar indo sobrepor-se e interferir. Posteriormente ao chegar ao alvo detector o aspecto corpuscular de localização materializa-se então dando origem, ao fim de um certo tempo, a uma repartição interferencial.

Apesar da oposição encontrada Bohr conseguiu, por motivos que ainda hoje permanecem pouco claros, impor à comunidade científica esta estranha maneira de olhar para o mundo no célebre Congresso Solvay de Setembro de 1927. Esta oposição veio da parte de alguns dos mais ilustres físicos de então. Só para citar alguns, referiremos: Max Planck, Einstein, Schrödinger e de Broglie. Apesar de vencidos estes físicos não deixaram de se opor, e criticar, sempre que possível, a concepção borheana da física quântica. De início estas críticas manifestaram-se sobretudo nos chamados paradoxos quânticos, quer dizer, em situações bastante insólitas, totalmente contra o bom senso, a que se é conduzindo ao aceitar o paradigma da Escola de Copenhaga.

Um destes paradoxos, bem conhecido, foi proposto por Schrödinger, o chamado gato de Schrödinger, ilustrado na Fig.6.

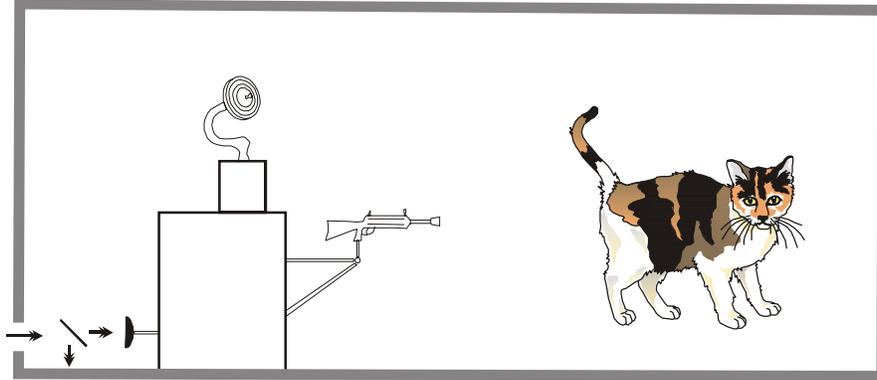


Fig.6 – O gato de Schrödinger

Esta experiência, de natureza inteiramente conceptual, consta essencialmente de uma caixa blindada onde se encontra um gato, como indicado na figura. Na caixa foi feito um orifício por onde pode entrar um único sistema quântico, neste caso um fóton. Este fóton, após entrar no orifício, encontra um espelho semi-espelhado com a propriedade de reflectir ou transmitir o fóton com igual probabilidade. Se o fóton for reflectido vai ser absorvido pelas paredes da caixa e nada acontece. Se, por acaso, o fóton é transmitido vai encontrar pela frente um sensor fotónico que detecta a sua presença e ao mesmo tempo envia um sinal para o computador. O computador, uma vez recebido o sinal, vai actuar o sistema de pesquisa, uma antena de radar, que localiza o gato. Uma vez localizado o alvo, a espingarda é automaticamente 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 então o dispositivo experimental preparado, com o gato lá dentro, e vamos 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 na caixa tinha 50% de probabilidade de ser absorvido e 50% de activar ao detector. Se 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% 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. Admitir que o fóton seria ou reflectido ou transmitido seria equivalente a negar o aspecto extenso do ente quântico, neste caso do fóton, e portanto excluir o aparecimento de interferências observáveis no caso da experiência com duas fendas. 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 existência de uma 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 decisivo, 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!

Nesta altura pode-se perguntar como foi possível, com um paradigma desta natureza, criar uma teoria matemática coerente e ainda para mais dotada de uma enorme capacidade explicativa e preditiva. Convém ter presente que a Mecânica Quântica é, provavelmente, a mais poderosa teoria física até hoje construída pelo homem. A resposta a esta questão reside, essencialmente, na chamada análise de Fourier.

A análise de Fourier foi criada, para resolver o problema da transmissão, da difusão, do calor, por Joseph Fourier, um engenheiro de Napoleão Bonaparte que o acompanhou na sua campanha do Egipto. No fundo, o que Fourier mostrou é que qualquer função razoavelmente bem comportada podia ser expressa como uma soma de senos e de cossenos, quer dizer, de ondas planas harmónicas. Assim qualquer estrutura, uma partícula por exemplo, pode ser descrita a partir de uma composição de ondas planas harmónicas como se indica na Fig.7.

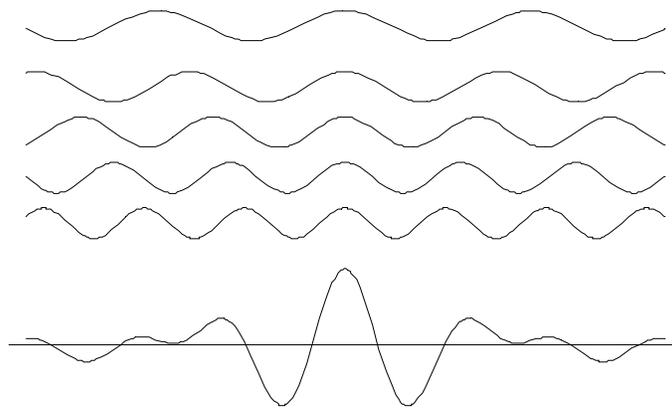


Fig.7 – Soma de ondas planas harmónicas.

Na Fig.7 estão representadas apenas cinco ondas harmónicas e a sua soma. Como se pode observar, mesmo com tão poucas ondas, é possível, ainda assim, 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. Começam, numa certa região do espaço e num certo instante, e têm, 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. Assim vai afirmar que tudo é constituído por ondas harmónicas infinitas que existem em todo o espaço e todo o tempo. Esta atitude corresponde, de certo modo, a um regresso mais ou menos disfarçado ao paradigma platónico da circularidade.

Platão para conciliar o devir com a permanência considera que o movimento perfeito só se encontra na esfera. Isto, porque ao rodar a esfera mantém inalterada a sua forma. Portanto, apesar de estar em movimento, a esfera permanece, de certo modo, sempre igual a si própria. Este paradigma parte do princípio de que o único movimento perfeito é o circular. Assim, no Céu, onde reina a harmonia e a perfeição, todos os corpos devem descrever movimentos circulares e uniformes. Se as órbitas dos planetas, que em grego significa astros errantes, não parecem circulares, isso deve tratar-se de uma ilusão dos nossos sentidos. Pois, de acordo com aquele princípio de perfeição, elas devem, em última análise, resultar de uma judiciosa combinação de movimentos circulares perfeitos.

Os sucessores de Platão lançaram-se a esta gigantesca tarefa da explicação da harmonia e perfeição dos céus em termos do paradigma da circularidade. Este esforço, que dura vários séculos, culmina com a monumental obra de Cláudio Ptolomeu *O Almagesto*, termo árabe que significa, *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 e eterno, sobre um eixo, como se pode ver na Fig.8, dá origem a uma oscilação, a uma onda, também eterna. Esta onda designa-se por harmónica uma vez que resulta de um movimento perfeito e harmónico que não teve começo nem terá fim.

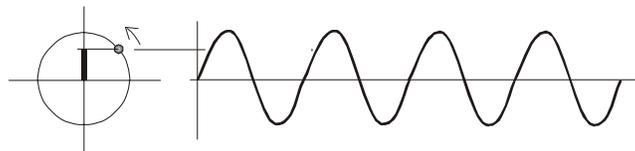


Fig.8 – A projecção, sobre o eixo vertical, dum ponto descrevendo um movimento circular é uma onda harmónica.

Um corolário imediato do paradigma borheano, onde o primado é dado às 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.9, são constituídos em última análise, neste paradigma, pela soma de um número muito grande de ondas harmónicas infinitas.

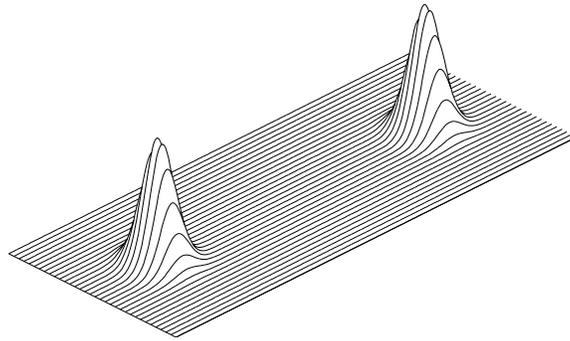


Fig.9 – A soma de um número muito grande de ondas harmónicas dá origem a duas partículas.

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 infinitas, 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 enquanto a da esquerda se aproxima, como está indicado na Fig.10.

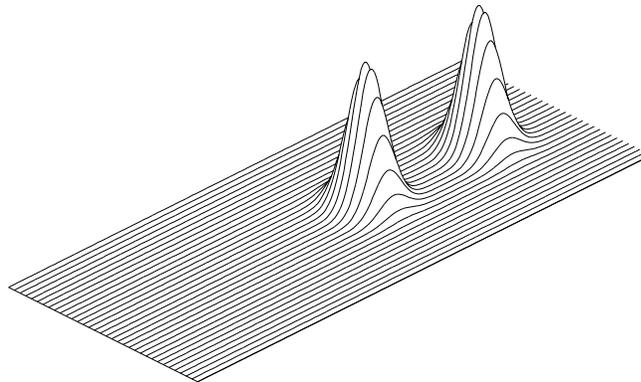


Fig.10 – Uma partícula permanece na mesma posição enquanto a outra se aproxima.

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. Apesar de tudo, quando observada, uma partícula possui, na verdade, uma energia bem definida. Daqui Bohr retira a conclusão seguinte: Antes da medida, aquilo que existe é todo um conjunto de partículas potenciais, cada uma com uma energia perfeitamente definida mas, no entanto, destituída de 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 perfeitamente definida. Assim, antes da medida, a partícula, de facto, não existe realmente. Tudo aquilo que existe é apenas um conjunto de potencialidades, de partículas potenciais, das quais uma delas pode eventualmente ser materializada pela observação.

4. SOLUÇÃO CAUSAL DO PROBLEMA

Iremos agora ver como é possível explicar o dualismo onda-corpúsculo, com recurso a uma teoria causal e coerente, sem qualquer necessidade de negar existência de uma de uma realidade objectiva e independente do observador.

O combate em defesa da causalidade começou logo no início da formação da mecânica quântica. Uma plêiade de físicos, dos quais poderemos referir, alguns dos próprios fundadores da Mecânica Quântica, tais como: 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, ao físico francês, Louis 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 da ontologia, não local e não temporal, de Fourier.

Precisamente, em virtude deste mesmo facto, todo esse trabalho estava, de certo modo, inevitavelmente condenado, logo à partida, apenas 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 sempre, necessariamente, de uma sobreposição de ondas harmónicas “perfeitas”, cada qual com a sua energia própria. Por esta mesma razão não é possível conceber sistemas objectivos dotados de propriedades locais e simultaneamente possuindo individualidade própria.

Afirmar que qualquer sistema físico finito é constituído, em última análise, por ondas harmónicas 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 matemático, 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, a separabilidade e a individualidade. Estando logo à partida espartilhados pela aceitação implícita de um paradigma não local, cujas verdadeiras implicações eram pouco claras, não podiam construir uma verdadeira teoria causal local. A elaboração de uma teoria causal que garantisse a individualidade dos sistemas, resultava, dentro deste quadro conceptual, uma tarefa deveras difícil, para não dizer mesmo de todo impossível.

Para se romper este ciclo vicioso torna-se necessário recusar, de uma vez por todas, a ontologia de Fourier. É preciso, pelo contrário, 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 alguns, altos domínios da física teórica, mas sim nos “simples” domínios das aplicações da física onde os investigadores estão permanentemente confrontados com a realidade prática do dia a dia e por isso tem que ter os pés bem assentes na terra. Foi precisamente 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.

A título de exemplo mostramos, na Fig.11, uma aplicação simples da eficácia das onduletas. Na primeira figura temos a imagem da Escola Naval tal como se pode

encontrar na Internet. Esta imagem original é analisada e em seguida reconstruída com a técnica matemática das onduletas. A segunda imagem corresponde a uma reconstrução em que se utilizou 3% da informação ou seja, em que se deitou fora 97% da informação. Na última foi utilizada apenas 10% da informação contida na imagem original.



Fig. 11 - Reconstrução por onduletas da Escola Naval. Cortesia do Professor Amaro Rica da Silva

Uma vez dispor de uma ferramenta matemática que permite a análise local torna-se relativamente simples dar o passo seguinte. Este consiste simplesmente em aceitar, como natural, que um impulso finito, uma onda física real, pode ter, na verdade, uma frequência, e portanto, uma energia bem definida. Uma nota emitida por um piano bem acordado tem uma frequência bem definida apesar de ter uma duração finita no tempo. Assim 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.12

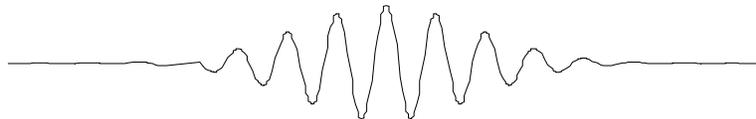


Fig.12 – Onduleta de Morlet ou gaussiana

As partículas e restantes sistemas podem agora ser representados por uma ou, eventualmente, 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.13. Nesta figura, o mesmo sinal original pode ser formado pela soma quer de ondas finitas quer de ondas harmónicas infinitas.

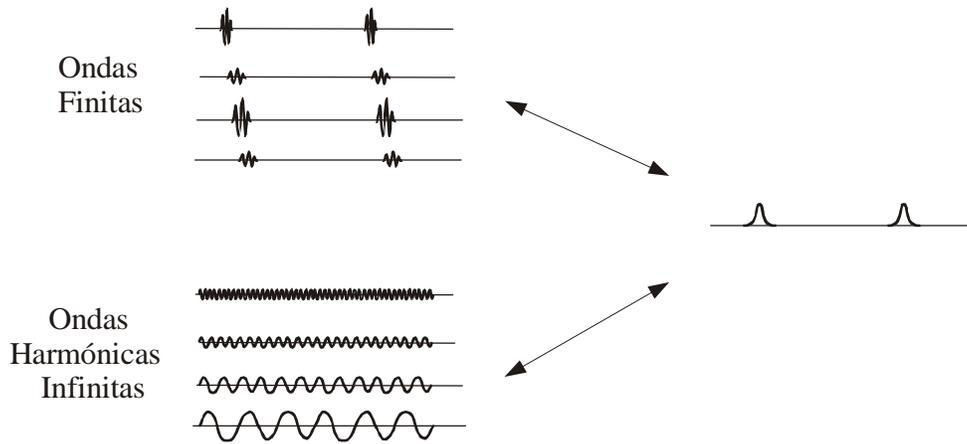


Fig.13 – Composição do mesmo sinal por ondas finitas e infinitas

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.

Quando se trata de 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. É precisamente esta sua capacidade de localização dá às onduletas a sua grande utilidade e eficácia na compressão da informação.

Assim no caso da análise por ondas finitas os sistemas podem conservar toda a sua independência e 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 de Fourier. Para tal basta aumentar a dimensão da onda finita. No limite esta pode tornar tão grande quanto queiramos, tornando-se assim, praticamente, numa onda harmónica infinita.



Fig.14 – No limite a onduleta gaussiana aproxima-se de uma onda harmónica

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.15.

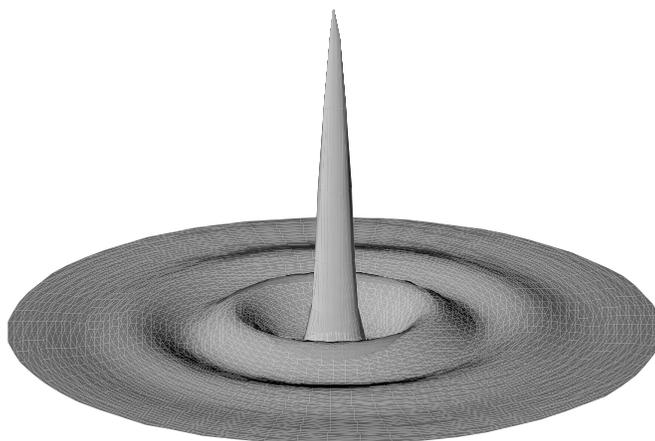


Fig.15 – Representação gráfica da partícula quântica

Neste modelo, causal e local, uma partícula quântica constitui um sistema deveras complexo. Assim, não mais é possível representá-la com um modelo simplista que apenas lhe atribui uma posição. A partícula quântica é composta tanto por uma região extensa, uma onda de fraca energia, como 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.

Convém aqui referir brevemente que existem fundamentalmente dois processos de interacção: os lineares e os não lineares. Os lineares, sem dúvida os mais simples de estudar, são aqueles em que o todo é precisamente igual à soma das partes. Quer dizer, estudar um simples elemento ou o conjunto de muitos é exactamente a mesma coisa. Por outro lado existe uma relação directa entre a acção aplicada ao sistema e a sua resposta. Os processos não lineares são muito mais complexos. De tal modo que pequeníssimos efeitos dão origem a grandes resultados, não existindo, em geral, qualquer relação explícita entre a acção e a resposta. Neste caso o comportamento de um sistema individual é completamente diferente do comportamento do todo formado pela reunião de muitos sistemas individuais.

Como se constata, ao nível quântico, existe uma diferença significativa entre os conceitos de partícula e de corpúsculo. Estas palavras que anteriormente eram consideradas como sinónimas, passam a ter, ao nível quântico, significados inteiramente diferentes. Uma partícula é um sistema deveras complexo possuindo extensão e localização enquanto que um corpúsculo é uma entidade caracterizado apenas pela sua posição,

Em certas condições experimentais torna-se possível isolar ondas guia 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 quântica a experiência das duas fendas tem uma explicação extremamente simples e intuitiva, tal como se pode observar na Fig.16.

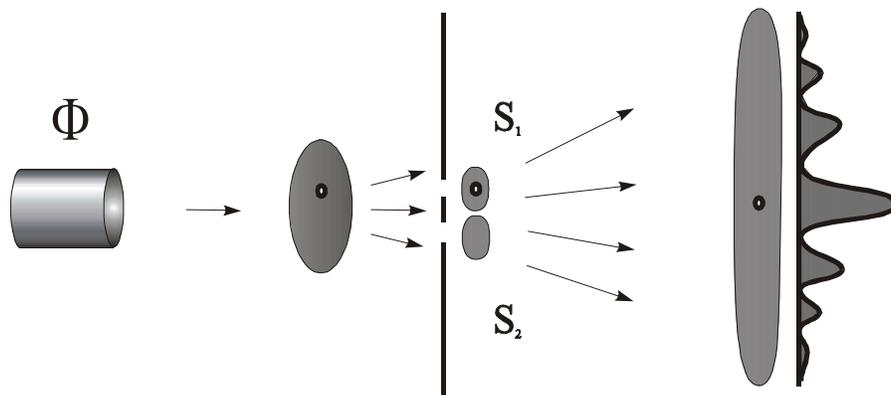


Fig.16 – Descrição causal e real da experiência das duas fendas

A partícula quântica emitida pela fonte, formada pela onda guia extensa mas finita, transporta no seu seio o corpúsculo extremamente localizado. Ao chegar ao anteparo acontece que a onda guia como é extensa passa pelos dois orifícios ao mesmo tempo. A singularidade, de pequeníssimas dimensões, passa por um ou por outro orifício, 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 agora guiar, 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. Quer dizer, nas zonas onde a intensidade da onda total for maior. À medida que o tempo decorre a distribuição destes impactos, no alvo

detector, 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 perfeitamente claro.

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

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

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

Armados destas ferramentas conceptuais torna-se agora possível elaborar 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 interacciona 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 distintas de observação, da mesma realidade. Tal como, por exemplo, a água que ao nível de descrição macroscópica pode e deve ser considerada como um sistema contínuo e contudo ao nível microscópico é mais conveniente ser descrita como uma entidade discreta formada por moléculas. Na verdade trata-se sempre da mesma entidade, a água! No entanto, consoante o nível de descrição, é mais conveniente nuns casos considerar essa entidade como continua noutros discreta.

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, do ponto de vista matemático, 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 global. 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 assim a duas equações, uma para os corpúsculos, outra para as ondas, cujas soluções são então tratadas como entidades 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.17.

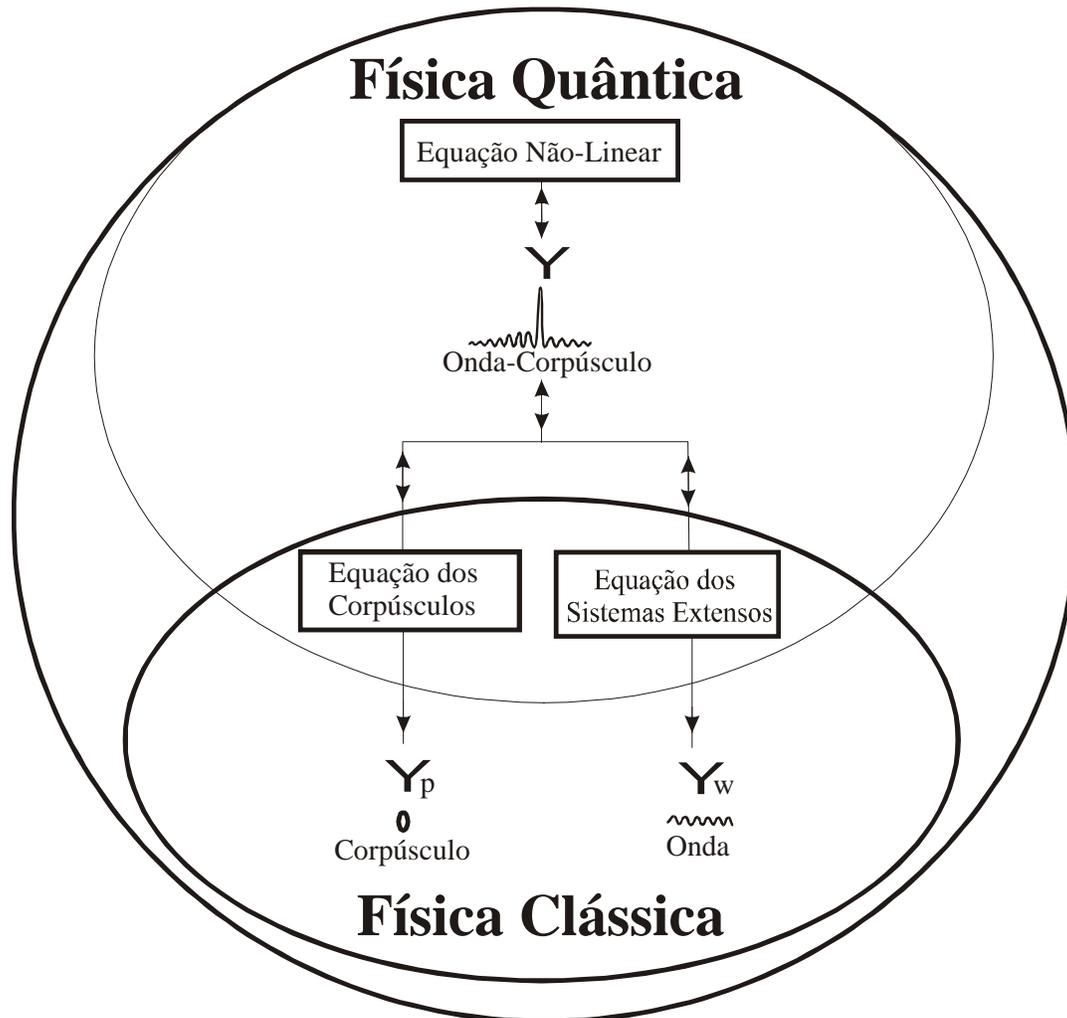


Fig.17 – Síntese global dos níveis de descrição quântico e clássico

A realidade é una 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 a experiência conceptual antes considerada, do gato de Schrödinger, deixa 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.

Verificamos assim que é possível construir uma física causal capaz de explicar a fenomenologia quântica em termos causais e intuitivos sem qualquer necessidade de negar a existência de uma realidade objectiva, ou sequer ter que invocar propriedades misteriosas de carácter transcendente ou mesmo mágico.

5 – O que dizem as Experiências

Por fim, e uma vez que as teorias físicas só podem ser validadas ou invalidadas pela evidência experimental iremos referir factos experimentais concretos que falsificam o mais importante pilar em que assenta o paradigma indeterminista de Niels Bohr, as conhecidas relações de indeterminação de Heisenberg.

As relações de indeterminação de Heisenberg afirmam 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. Assim, segundo estas relações, quanto melhor for o nosso conhecimento da posição de uma partícula tanto pior se conhecerá a sua velocidade e vice-versa.

A expressão matemática das relações de Heisenberg resulta directamente da análise de Fourier. Como se pode ver pela Fig.18, quando se tem uma velocidade bem definida, e portanto um erro na determinação da velocidade igual a zero, temos uma única onda harmónica infinita. Neste caso, o erro da posição é infinito pois que, nestas condições, a partícula pode ser localizada em todo o espaço. Quando temos várias ondas quânticas, cada uma com a sua velocidade, resulta uma incerteza na velocidade que depende do número de ondas cuja composição vai dar origem a uma região de interferência não nula. O erro da velocidade depende, neste contexto, do número de ondas usadas, enquanto que o erro na determinação da posição depende da dimensão da estrutura resultante da sobreposição das ondas. Por outro lado, quanto mais ondas de Fourier adicionarmos menor é a dimensão região de interferência. No limite, quando tivermos um número infinito de ondas, correspondendo a um incerteza na velocidade infinita, a região onde a partícula pode ser localizada reduz-se a um ponto ou seja a um erro zero na posição. As relações de indeterminação de Heisenberg são precisamente, neste caso, o produto das incertezas da posição e da velocidade que vem sempre igual, no caso ideal, ou em geral maior que uma certa quantidade fixa múltipla da constante de Planck.

FOURIER

Ondas Harmónicas

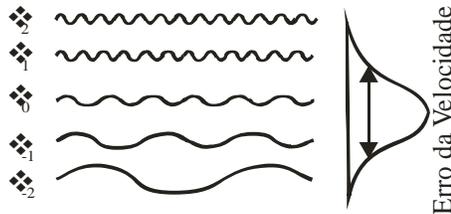


Erro da Velocidade = 0

Sobreposição



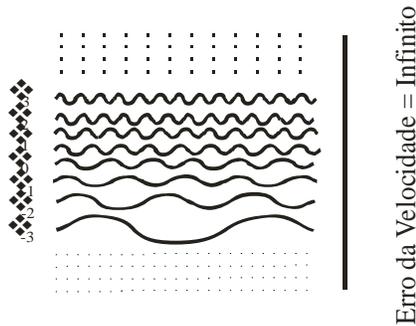
Erro da Posição = Infinito



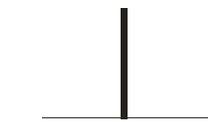
Erro da Velocidade



Erro da Posição



Erro da Velocidade = Infinito



Erro da Posição = 0

$$\boxed{\text{Erro da Posição}} \times \boxed{\text{Erro da Velocidade}} = \boxed{\text{Quantidade}}$$

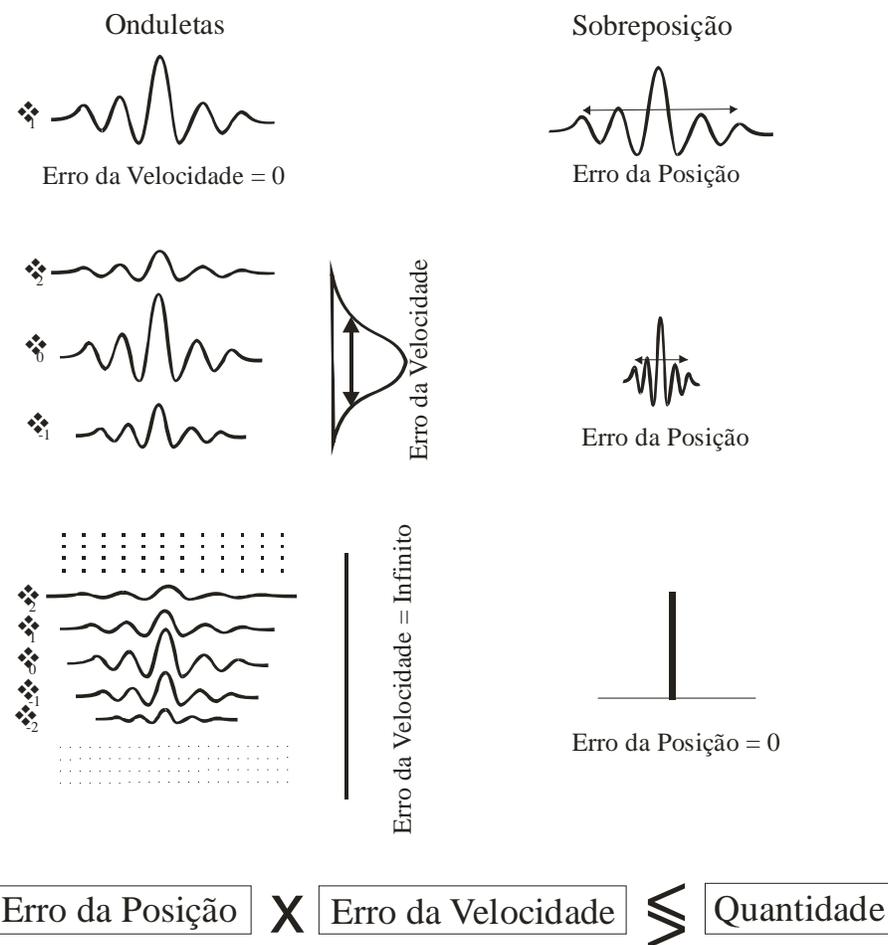
RELAÇÕES DE INDETERMINAÇÃO DE HEISENBERG

Fig.18 – Relações de indeterminação de Heisenberg

Numa abordagem causal toda esta problemática é completamente modificada. A utilização das ondas finitas, onduletas, em substituição das ondas infinitas de Fourier permite estabelecer, como se pode constatar na Fig.19, por um processo em tudo análogo ao de Fourier, umas relações de incerteza causais e locais mais gerais. Neste caso a uma velocidade bem definida, e portanto a um erro na velocidade de zero, corresponde uma onduleta finita, ou seja um erro finito para a determinação da posição do corpúsculo. De notar que quanto mais pequena for a onduleta de base tanto mais pequeno é o erro da posição. No fundo, com as onduletas, recupera-se a noção intuitiva de que a precisão de uma medida depende, em última instância, do instrumento de medida e portanto da escala de observação. Neste caso o instrumento de medida é representado pela onduleta. Se esta

onduleta tem uma dimensão que se aproxima de infinito então o erro de localização do corpúsculo também se aproxima de infinito. 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 gerais de incerteza não têm qualquer estatuto ontológico, traduzem apenas uma mera impossibilidade circunstancial, inerente a qualquer medida concreta onde existe, em geral, sempre um erro associado. Numa medida física real os erros resultam, em última análise, dos instrumentos usados na determinação das grandezas envolvidas. Uma melhoria dos instrumentos de medida pode eventualmente diminuir os erros e melhorar assim a previsão dos resultados.

ONDULETAS



RELAÇÕES DE INCERTEZA CAUSAIS

↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
 RELAÇÕES DE INDETERMINAÇÃO DE HEISENBERG

Fig.19 – Relações causais de incerteza

A evidência experimental acerca dos limites reais da teoria indeterminista bohrreana surgiu no domínio da observação microscópica. 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.

Os microscópios comuns têm um limite de resolução, quer dizer uma capacidade de separarem dois pontos, que depende intrinsecamente da natureza ondulatória da luz. A sua resolução teórica máxima é de metade do comprimento de onda da luz utilizada.

Os super-microscópios foram desenvolvidos, em meados dos anos 80 do século passado, por Binnig e Roher dois investigadores da IBM que ganharam, mais tarde, o prémio Nobel por essa mesma descoberta. Este microscópio, que funciona com electrões, está representado na Fig.20, juntamente com uma imagem obtida com ele.

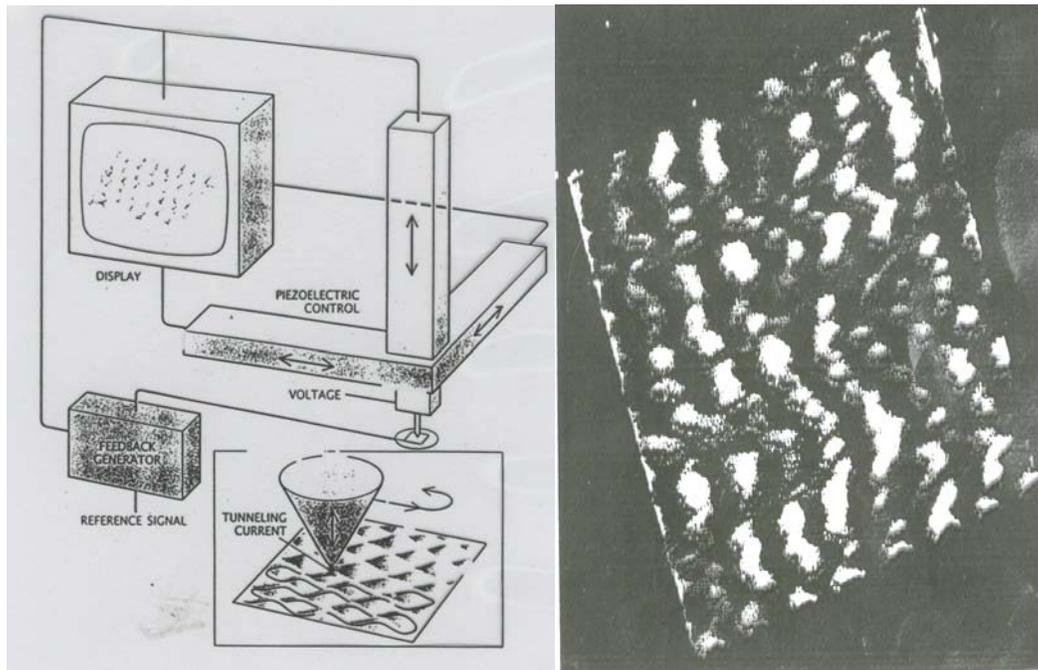


Fig.20 – Microscópio de efeito de túnel

O princípio destes novos microscópios foi estendido por Pohl e pelo seu grupo, também investigadores da IBM, ao domínio óptico. Neste momento existem super-microscópios ópticos com uma resolução prática da ordem de 500 vezes superior ao limite teórico dos microscópios de Fourier.

A previsão dos erros das medidas feitas com um microscópio usual de Fourier para a posição e a velocidade de uma partícula são perfeitamente descritos pelas relações de

Heisenberg. Podemos mesmo acrescentar que elas constituem o exemplo paradigmático da sua aplicação concreta.

O mesmo já não acontece com os super-microscópios. A previsão dos erros das mesmas medidas, da posição e da velocidade de uma partícula, efectuadas com os microscópios, da nova geração dá resultados que entram em contradição com as relações de indeterminação de Heisenberg. Quer isto dizer, as relações de Heisenberg não conseguem prever os erros dos resultados das medidas feitas com estes super-microscópios. Este facto significa que elas não são suficientemente gerais para poderem descrever toda a fenomenologia quântica. Os mesmos resultados são, naturalmente, descritos pelas fórmulas gerais de incerteza e portanto perfeitamente integradas no quadro conceptual da nova mecânica quântica.

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.
- K. Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics*, Hutchinson, London, 1982.
- T.S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, Univ. of Chicago Press, 1970.
- W. Heisenberg, *Physics and Philosophy*, Harper, N.Y. 1958.
- E. Schrödinger, *Science, Theory and Man*, Allen and Unwin, London, 1935.
- 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.
- J.R. Croca, *A Razão na Física Quântica*, in *Razão e Espírito Científico*, edição Cátedra a Razão, coord. E. Chitas and A. Serrão, Edições Duarte Reis, Lisboa 2004.
- A. Grossmann and J. Morlet, *SIAM J. Math. Anal.* **3**, 723(1989); *Decomposition of Function into Wavelets of Constant Shape and Related Transforms*, (World Scientific, Singapore, 1980).
- C.K Chui, *An Introduction to Wavelets*, (Academic Press, N.Y. 1992)
- G. Binnig and H. Rohrer, *Helv. Phys. Acta* 55(1982)726
- D.W. Pohl, W. Denk and M. Lanz, *Appl. Phys. Lett.* 44(1984)651