

# FÍSICA QUÂNTICA:

ESBOÇO HISTÓRICO

E

PERSPECTIVAS

FILOSÓFICAS

PEDRO MANUEL CABRAL DA FONSECA

1º ANO. ÁREA C

TRABALHO APRESENTADO PARA A CADEIRA DE INTRODUÇÃO ÀS TEORIAS FÍSICAS

# Índice

Introdução: ..... 2

## *I – SICAS ÃO ÀS A DE O I 0-1927)*

O Nascimento da física quântica. .... 5

I – O caminho para a revolução dos quanta. .... 7

1 – Plank e a radiação do corpo negro..... 7

2 – Einstein e o efeito fotoelétrico..... 9

Ondas de luz..... 9

Ondas ou partículas?..... 11

3 – Átomos quânticos..... 13

O átomo de Rutherford..... 13

Bohr, átomos e postulados..... 14

II – Mecânica Quântica. .... 16

1 – Ondas e corpúsculos..... 16

2 – Ondas de Schrödinger..... 19

3 – Mecânica Matricial..... 20

O princípio da incerteza..... 21

## *II – SICAS ÃO ÀS A DE O II AS*

1. Introdução ..... 24

2. A interpretação de Copenhaga ..... 25

Dificuldades da interpretação de Copenhaga..... 29

A redução do "pacote de ondas"..... 29

Consequências da redução do pacote de ondas  
como resultado de uma observação..... 30

A Experiência de EPR..... 30

O teorema de Bell..... 31

Consequências da experiência de EPR..... 31

Defensores e opositores da interpretação de Copenhaga. .... 32

3. Conclusão – modelos e mais modelos. .... 35

Bibliografia ..... 37

Notas ..... 38

Nota: As notas de rodapé são designadas por números árabes. As notas designadas por números romanos encontram-se no final do trabalho

## I — Introdução:

O nosso século obrigou-nos a duas importantes transformações na imagem que tínhamos da natureza. Estas duas imagens resultaram do avanço tecnológico que nos permitiram abordar experimentalmente as regiões do muito pequeno. Em 1881 a experiência de Michelson e Morley veio abrir as portas à teoria da relatividade restrita, aplicável às grandes velocidades e distâncias. A teoria da relatividade, elaborada por Einstein e publicada em 1905 (relatividade restrita) e 1916 (relatividade geral) veio redefinir os conceitos de tempo, velocidade, massa, energia e gravidade. Por outro lado, no campo do muito pequeno, surgiu no primeiro ano do século XX o primeiro passo de uma teoria que levantou questões conceptuais que ainda hoje não foram resolvidas (pelo menos com consenso).

É sobre esta última teoria que iremos tratar, ou melhor, sobre as implicações filosóficas (ou conceptuais) que esta teoria, a teoria quântica, parece implicar.

Devo confessar que, se tivesse que escolher o tema do meu trabalho hoje, não teria escolhido por certo a teoria quântica como tema. E isto por duas razões que interessa explicar. Em primeiro lugar porque a matemática subjacente à mecânica quântica é difícilíssima. Apesar das minhas tentativas foi-me impossível qualquer aproximação (com excepção das equações de de Broglie sobre a relação onda-corpúsculo) à estrutura matemática pelo que fica desde já comprometida uma interpretação pessoal da mecânica quântica (tudo o que sei dela é o que alguns físicos disseram dela). Por outro lado surgiu um problema com que não contava e que dificultou muito a elaboração deste trabalho. É que mesmo os físicos que conhecem a fundo as fórmulas matemáticas não estão de acordo nem com a sua interpretação nem o que é que delas é relevante filosoficamente.

Assim, este trabalho terá de ser uma interpretação de interpretações de físicos. Haveria duas hipóteses possíveis para escapar a este problema. Uma seria delimitar o meu estudo a um autor em particular. Isto teria a vantagem de tornar mais exacto o meu trabalho mas seria bastante empobrecedor de uma temática que é tão rica. Além do mais só me apercebi da grande variedade de opiniões depois de ter lido uma considerável porção de livros sobre o assunto. Aquilo que tentarei fazer é algo mais arriscado. Irei tentar descrever o pólo à roda do qual as atenções dos físicos se concentram tentando discernir a razão fundamental que leva à tomada de posições tão diversas.

Mas, se isto não for conseguido, este trabalho terá pelo menos o mérito de evidenciar as profundas divergências que os físicos ainda hoje têm a respeito da interpretação da teoria dos *quanta* e talvez seja também a prova da boa ou má exactidão dos livros de grande divulgação (sobre os quais eu me baseio).

O trabalho pode ser dividido em três partes. Na primeira far-se-á apenas um esboço histórico dos vários passos que levaram ao desenvolvimento da física quântica. Nesta parte do trabalho

## *Introdução*

procurei sobretudo dar uma visão precisa dos mais importantes momentos históricos de onde surgiu a moderna física quântica. Na segunda parte serão desenvolvidas as perspectivas filosóficas criadas em torno da física quântica. Devido ao grande número de interpretações existentes não foi possível desenvolver de uma forma correcta este tema. Limitei-me a dar um breve resumo das principais interpretações com destaque para a interpretação de Copenhaga.

A terceira parte é uma conclusão que deveria abordar uma das implicações filosóficas que a física quântica provoca. A relação entre o modelo como base racional para a compreensão-previsão da realidade, e a aparente falta de um  $\lambda\omicron\gamma\omicron\varsigma$  aplicável ao mundo atómico.

# **I — ESBOÇO HISTÓRICO (1900-1927)**

## I — O Nascimento da física quântica.

Em finais do século XIX a ciência estava apoiada em sólidos alicerces e explicava praticamente tudo o que se podia observar. A energia era vista como uma entidade que variava continuamente. O mundo era algo completamente objectivo que púnhamos diante de nós e submetíamos a análise, partíamos do princípio de que todas as partículas eram regidas por leis bem precisas e que, portanto, o seu comportamento futuro estava bem determinado (se bem que não o fosse possível conhecer na prática). Foram precisamente estas noções básicas que a física quântica veio pôr em causa.

Importa realçar que a física quântica, embora implique uma reformulação da nossa imagem da natureza, foi feita com base nos conceitos e modelos da física clássica e só a tentou ultrapassar quando de todo foi impossível conjugar as previsões com as observações. Isto é um ponto a favor da exactidão da física quântica. De facto, a maior parte dos problemas que a física quântica veio resolver eram *impossíveis* de se explicarem pela física clássica. Se digo que são impossíveis não é porque os conheça a fundo mas porque muitos cientistas os tentaram resolver de forma diferente e não conseguiram.

Esta situação aplica-se a quase todas as descobertas que iremos descrever. Por outro lado, físicos como de Broglie, Andrade e Silva, Schrödinger ou Einstein, entre muitos outros, tentaram, desde o aparecimento da física quântica até aos nossos dias, enquadrá-la numa perspectiva mais familiar. Até hoje todas as tentativas ou falharam ou têm implicações tão (ou mais) estranhas do que as que tentavam eliminar. Parece portanto que a física quântica passou as piores provas porque poderia ser submetida e, a não ser que se venha a registar uma experiência inesperada ou uma interpretação verdadeiramente genial não devemos contar com grandes evoluções tão cedo. Por outro lado é certo que a *interpretação* ortodoxa da física quântica nos deixa um sentimento de insatisfação. A ideia de que existe um mundo que não podemos descrever, que toda a ciência se resume ao domínio não da explicação mas apenas da previsão de experiências, está ligado a uma época em que dominavam os ideais do positivismo lógico, hoje já ultrapassados. No entanto, até hoje, nenhuma tentativa para explicar o que está por detrás das nossas experiências logrou o consenso.

A diferença inicial entre a física quântica e a física clássica reside na noção de energia. Na física clássica a energia de um determinado sistema podia variar de forma contínua, isto é, em quantidades arbitrariamente pequenas. A física quântica, no entanto, diz-nos que a energia só pode variar por saltos; existem portanto *quanta*<sup>1</sup> de energia, que são os pedaços mais pequenos de energia que podem existir.

---

<sup>1</sup> *Quanta* é o plural de *quantum*, palavra latina que significa pedaço ou bocado. Em física moderna é a quantidade mínima de energia.

Não parece ser de facto uma diferença assim tão grande. Podemos, no entanto, retirar daqui que nunca podemos saber a posição *e* a velocidade exacta, por exemplo, de um electrão. Isto explica-se facilmente se pensarmos que, para haver uma medição de um objecto, este tem de se relacionar com outra parte do universo (de preferência o nosso instrumento de medição) o que implica uma transmissão de energia de pelo menos um *quantum*; como ao aplicar uma quantidade de energia modificamos o movimento do objecto, podemos deduzir que não podemos medir um objecto sem lhe introduzir uma quantidade mínima de movimento que não podemos controlar. Além disso veremos mais à frente, que, quanto menos energia utilizarmos para medir o objecto mais incerta será a informação sobre a sua localização.

Podemos imaginar que um ser divino poderia saber o que quisesse de um objecto sem que tivesse qualquer necessidade de interagir com ele visto que o saberia por um qualquer processo mágico. Seja como for, isto, para nós, não tem grandes efeitos práticos visto que não somos seres divinos e o nosso conhecimento sobre as coisas exige (em princípio) que entremos em contacto com elas.

Esta explicação é facilmente perceptível, no entanto, não está totalmente correcta. Os motivos são bastante mais profundos e prendem-se com a necessidade de utilizar *simultaneamente* o conceito de onda e de partícula nas fórmulas da física quântica, embora esta seja uma forma simples de compreender a situação. No entanto as explicações mais complicadas são também as mais controversas. Espero dar uma ideia dessas posições e controvérsias até ao fim do meu trabalho.

|| —



## **I – O caminho para a revolução dos quanta.**

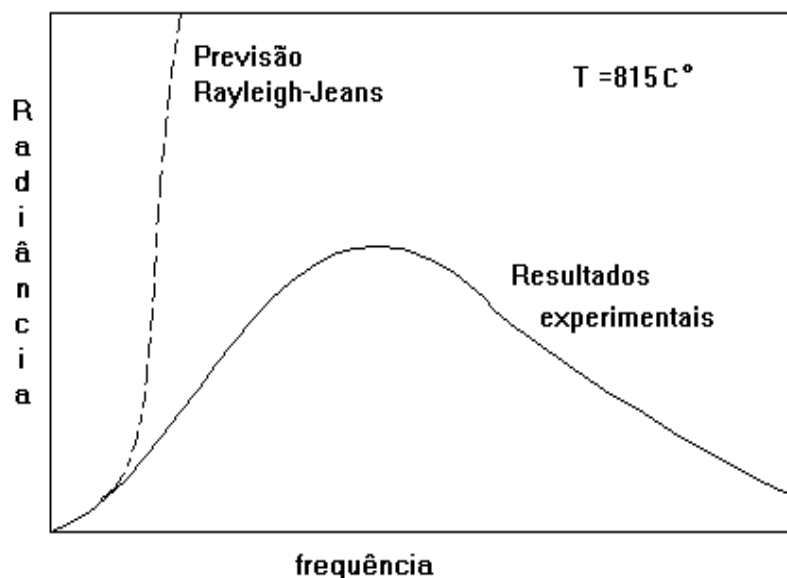
### **1 – – Plank e a radiação do corpo negro.**

É um fenómeno conhecido que quando um corpo é aquecido emite radiação. Quanto mais quente está o corpo mais aumenta a frequência da radiação. Desde finais do século XIX que vários físicos tentavam encontrar uma fórmula que ‘explicasse’ a relação entre a temperatura do corpo e a frequência da radiação emitida. Para estudarem melhor a curva da radiação eram utilizados certos objectos especiais com o nome de corpo negro. Um corpo negro é um objecto que absorve toda a luz que nele incide. Na verdade não são muito difíceis de arranjar, basta arranjar um objecto oco pintado de preto por dentro – por exemplo, uma esfera. Depois faz-se um pequeno orifício na esfera. Assim, toda a luz que passe para dentro desse buraco será absorvida no interior da esfera. O interesse dos corpos negros é que, quando aquecidos, apresentam todos a mesma curva de radiação para as mesmas temperaturas. Além de bom absorvente o corpo negro é também um bom emissor.

As medições efectuadas à curva de radiação emitida por um corpo negro revelavam uma bossa nas zonas das médias frequências mas que descia na zona das baixas e muito altas frequências. No entanto não se conseguia arranjar uma boa explicação para a curva de radiação. Desde há algum tempo que Rayleigh e Jeans estavam a trabalhar no problema da radiação do corpo negro. No entanto as fórmulas a que chegavam só explicavam a emissão de radiação a baixas frequências. À medida que a temperatura do corpo negro subia a teoria previa a emissão de luz a frequências cada vez maiores originando a chamada catástrofe do ultravioleta.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Como curiosidade refira-se que, segundo Heisenberg, as medições precisas em que Plank se apoiou para fazer a sua fórmula foram feitos no Verão de 1905 por Curlbaum e Rubens e “quando Plank soube destes resultados, tentou representá-los por fórmulas matemáticas simples que parecessem plausíveis à luz da sua investigação sobre a ligação geral entre calor e radiação.” (Heisenberg, *Physics and Philosophy*, p.34). Refira-se também que o artigo onde é publicada a lei de Rayleigh, da qual resulta a catástrofe do ultravioleta só foi publicado em Junho de 1905 (Cf. *À Procura do Gato de Schrödinger*, p.37, n.3(N.T.)).



No diagrama pode observar-se a diferença entre as previsões teóricas clássicas de Rayleigh-Jeans, que levavam à catástrofe do ultravioleta e os resultados experimentais da radiação (radiação emitida por unidade de tempo) de um corpo negro aquecido a 815 C°

Plank, que começa a sua investigação em 1895, não vai trabalhar directamente sobre a radiação do corpo negro mas sobre a emissão e absorção de ondas electromagnéticas por pequenos osciladores eléctricos. No entanto a curva de radiação a que chega para o oscilador eléctrico é a mesma que se observa em corpos negros. A intenção seria a de desviar o problema da radiação para o que emitia a radiação, neste caso o oscilador eléctrico.

Plank, apoiado nos resultados das observações, tentou chegar a uma fórmula que coincidissem com eles. A fórmula foi conseguida em pouco tempo. De facto, em 14 de Dezembro de 1905, Plank anunciou-a numa reunião da Sociedade Berlinense de Física. Como a fórmula era totalmente nova Plank necessitou de lhe dar um significado físico. A ideia a que Plank chegou era a de que os osciladores só podiam emitir e absorver a energia em porções definidas, múltiplas de uma quantidade mínima, o *quantum*, o que implicava uma reformulação do conceito de energia.

Esta quantidade mínima de energia foi designada por  $h$  sendo hoje conhecida como constante de Plank. O seu valor, deduzido de resultados experimentais, é aproximadamente de  $6,62559 \times 10^{-34}$  joules/s.<sup>3</sup> A fórmula que relaciona a constante de Plank com a energia e a frequência é bem conhecida:

$$E = hv$$

<sup>3</sup> Como se pode facilmente reparar esta constante expressa uma energia por um tempo (uma acção). Gribbin relaciona esta propriedade com a teoria da relatividade de Einstein. Ver *À Procura do Gato de Schrödinger*, p.41.

onde  $E$  representa a energia,  $h$  a constante de Plank e a letra grega  $\nu$  (niu) a frequência.<sup>4</sup> A equação de Plank associa assim uma energia a uma frequência específica. A energia dessa frequência específica pode aumentar em múltiplos do *quantum* correspondente a essa frequência pela fórmula:

$$E = nh\nu$$

onde  $n$  é um número inteiro (1,2,3,4...). Assim uma frequência de 2Hz pode ter energias da ordem de  $n \times h \times 2$ . Ou seja, 2h, 4h, 6h, 8h, etc. Para uma frequência de 5kHz as energias variam em passos de 5000h. É por isso que a equação de Plank só começa a ter efeitos apreciáveis quando as frequências sobem, altura em que o *quantum* começa a ter um maior valor energético. Assim, quanto mais sobe a frequência de emissão mais energia é necessária à emissão de um *quanta* de luz.

No caso da radiação do corpo negro, muito poucos osciladores têm a energia necessária à emissão de um *quantum* de luz de alta frequência pelo que se verifica uma grande diminuição na radiação a altas frequências. A baixas frequências a emissão de radiação tende a comportar-se segundo as fórmulas de Rayleigh-Jeans visto que as discontinuidades se tornam cada vez mais pequenas.

A descontinuidade da energia levantava problemas importantes, Andrade e Silva refere a perplexidade que um físico clássico sentiria ao deparar com a teoria de Plank:

?? Por um lado implicaria que a variação da amplitude de uma onda teria de variar descontinuamente o que punha em causa a teoria de campo de Maxwell e Faraday que explicavam uma grande variedade de fenómenos. Além disso, não havia nenhuma razão para que esses pequenos pacotes de energia se deslocassem sob a forma de ondas. Por outro lado pensava-se que um electrão, ao oscilar no átomo, emitisse constantemente energia e que portanto diminuía a amplitude da sua oscilação de forma contínua. No entanto, se ele enviava a energia em pacotes teria de se supor que a amplitude da oscilação diminuía por saltos. Isto é, parava num determinado ponto para depois reaparecer num outro mais abaixo.

Estas questões, a novidade da ideia e a falta de outro tipo de confirmações levaram a que a ideia de Plank fosse a princípio olhada com alguma desconfiança, até que Einstein lhe pegou abrindo o seu domínio a outros campos e dando-lhe uma aceção muito maior.

## 2 – – ***Einstein e o efeito fotoeléctrico.***

Em 1899 Philip Lenard realizou uma experiência que exibia o chamado fenómeno fotoeléctrico. Este efeito deve o seu nome a Heinrich Herz que notou acidentalmente que uma placa de zinco, ao ser iluminada por luz ultravioleta, se carregava positivamente. Mais tarde várias experiências provavam que o mesmo acontecia com outros materiais e a diferentes frequências. Lenard, que estudava com rigor este efeito, fez incidir um feixe de luz monocromático sobre uma superfície metálica colocada no vácuo e verificou que sob a influência deste feixe a superfície

---

<sup>4</sup> Para uma descrição dos pormenores matemáticos ver, por exemplo, *Física Quântica*, pp.19-42.

emitia raios catódicos (electrões). A experiência mostrou também um resultado contraditório com a visão ondulatória da luz. À medida que aumentávamos a intensidade da luz havia um maior número de electrões ejectados da superfície metálica mas a energia destes mantinha-se constante. Por outro lado, quando aumentávamos a frequência da luz emitida (mesmo que diminuíssemos a sua intensidade) a energia de cada electrão ejectado da placa aumentava. Se baixássemos o suficiente a frequência da luz que atingia a placa, haveria um momento em que nenhum electrão seria ejectado, fosse qual fosse a intensidade da luz.

Segundo as teorias clássicas isto não deveria acontecer e ninguém foi capaz de explicar o fenómeno até que um jovem físico, aproveitando as ideias de Plank, resolveu o enigma de uma forma muito mais misteriosa.

## II — 2 — .1 *Ondas de luz.*

Desde as experiências de Young em 1801 que se sabia inequivocamente que a luz era constituída por ondas.<sup>5</sup> Young tinha demonstrado isto fazendo a experiência das duas fendas.

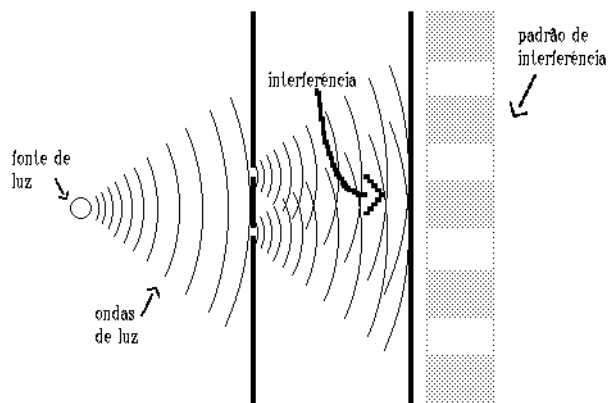
A experiência das duas fendas consiste na emissão de luz monocromática em relação a uma parede onde se fazem dois orifícios pouco afastados. Segundo o modelo ondulatório a luz atinge ambas as fendas e de cada uma delas sai uma nova onda circular (isto também acontece se utilizarmos um tanque com água e uma parede com dois orifícios). Estas novas ondas vão estender-se pelo espaço e interferir entre si. Isto é, vão ligar-se podendo fortalecer-se ou anular-se. Se duas ondas se juntam «em fase», isto é, juntando ambos os picos e ambas as cavas, a onda resultante terá o dobro da amplitude das ondas que lhe deram origem. No entanto, se as ondas se encontrarem em oposição de fase, isto é, juntando a cava de uma com o pico da outra, acabam por se anular.<sup>6</sup>

O que a experiência de Young tenta provocar é um fenómeno de interferência entre ondas de iguais frequências. Esta interferência provocaria um padrão visível – o chamado padrão de interferência – já que em certos sítios as ondas reforçar-se-iam sempre e noutros locais anular-se-iam sempre. Teríamos então lugares com grande intensidade luminosa interrompidos por outros de fraca ou nula luminosidade, mais ou menos como mostra a figura:

---

<sup>5</sup> A teoria ondulatória foi proposta pela primeira vez por Christian Huygens, um génio matemático, no século XVII embora tenha sido preterida em favor da teoria corpuscular de Newton.

<sup>6</sup> Podemos saber se duas ondas se vão reforçar ou anular através da distância que separa cada ponto da barra final e da fonte de luz. Se a fonte de luz estiver colocada a meio dos dois buracos saberemos que as ondas se reforçam num ponto em que a distância desse ponto à fonte emissora de luz seja igual.



Ora estes padrões de interferência verificaram-se de facto e só podem ser explicados através do carácter ondulatório da luz.

Embora a experiência de Young não tenha sido imediatamente aceite<sup>7</sup> foi desenvolvida em 1814 por Augustin Fresnel dando-lhe uma grande coerência e explicando através dela alguns fenómenos difíceis de explicar pela teoria corpuscular como as cores que se vêem numa mancha de óleo e que podem ser explicadas por fenómenos de interferência.

A teoria ondulatória foi depois aplicada e comprovada noutros campos. Maxwell atribuiu às ondas luminosas um campo electromagnético vindo assim as ondas luminosas como ondas electromagnéticas. Isto foi, mais tarde (em 1887) comprovado experimentalmente por Heinrich Herz que conseguiu produzir ondas por meios puramente electromagnéticos (abrindo assim o caminho ao rádio e à televisão). Isto era mais do que qualquer físico podia exigir para comprovar o carácter ondulatório da luz. Parecia por isso muito pouco provável que alguém viesse dizer que a luz era uma partícula. Tal como Gribbin afirma: “No fim do século XIX só um tolo ou um génio se teriam atrevido a sugerir que a luz era corpuscular. Fê-lo Albert Einstein.”<sup>8</sup>

## II — 2 — .2 Ondas ou partículas?

Em 1905, no nº17 da revista *Annalen der Physik*, Einstein publica três artigos que irão alterar o destino da ciência e da história de uma forma radical. Um prova pela primeira vez a existência dos átomos,<sup>9</sup> outro, formula a teoria da relatividade restrita, e o último explica o efeito

<sup>7</sup> Provavelmente devido ao apego sentido pelos físicos às ideias de Newton que os levavam a rejeitar a ideia e à pouca formação física de Young, que, refira-se por curiosidade, era médico e não físico, o que o impediu de defender a sua hipótese com mais firmeza.

<sup>8</sup> À *Procura do Gato de Schrödinger*, p.25.

<sup>9</sup> A existência dos átomos era uma hipótese que havia surgido há bastante tempo e que se considerava como quase certa por uma grande parte dos cientistas. No entanto havia ainda muitos que se recusavam a aceitar tal ideia e não houvera até à época nenhum facto experimental que levasse a concluir pela existência dos átomos. A este propósito citarei uma passagem do livro À *Procura do Gato de Schrödinger*, p.27:

“De 1860 a 1880 estes precursores [Maxwell e Boltzmann] estabeleceram o modelo de um gás como sendo o conjunto de muitíssimas partículas (átomos ou moléculas), supostas pequenas esferas duras movendo-se em todas as direcções, colidindo umas com as outras e com as paredes do recipiente que contém o gás. (...) No entanto continuava a faltar uma prova directa da

fotoeléctrico através da noção de *quanta* de luz. Destes três artigos só em relação a este último é que Einstein se referia como «verdadeiramente revolucionário». E de facto, por mais de uma década, Einstein ficou sozinho na sua defesa.<sup>10</sup> Isto deve-se, por um lado, às provas inequívocas que tinham sido dadas no século anterior provando o carácter ondulatório da luz e, por outro lado, à falta de experiências que confirmassem a existência dos *quanta* de luz (mais tarde chamados fotões).<sup>11</sup>

Segundo a física clássica é natural que se desprendam electrões de um metal sob a influência da luz. De facto a luz transporta uma determinada quantidade de energia electromagnética que vai influenciar os electrões aumentando a sua agitação. Se esse aumento for suficiente os electrões podem mesmo ver-se expelidos do núcleo pelo que se regista uma ejeção. Até aqui tudo bem. Acontece que, segundo a física clássica, a quantidade de energia electromagnética que a luz vai introduzir no material é proporcional a amplitude da onda de luz. Ora esta amplitude depende da intensidade com que emitimos a luz e não da sua frequência. Por isso, quando aumentássemos a intensidade da luz aumentaríamos a sua energia e, portanto, dever-se-ia verificar um aumento da energia proporcional dos electrões ejectados.

Não é no entanto isto que acontece pois, como já vimos, a energia dos electrões emitidos depende somente da frequência da onda de luz e, abaixo de uma certa frequência, não há qualquer emissão de electrões mesmo que a intensidade da luz seja fortíssima. A intensidade da luz

---

existência dos átomos. Alguns dos maiores físicos da época opunham-se tenazmente à hipótese atómica, e até o próprio Boltzmann se sentia na última década do século XIX como um remador solitário contra a maré. Em 1898 publica os seus cálculos detalhados com o comentário «para que, quando a teoria dos gases voltar a reviver, não seja necessário voltar a redescobrir muita coisa». Em 1906, doente e deprimido, infeliz pela contínua oposição à teoria cinética dos gases por parte de muitos dos grandes físicos da época, Boltzmann suicida-se. Desconhecia que alguns meses antes um obscuro teórico chamado Albert Einstein tinha publicado um artigo onde a existência de átomos era estabelecida para além de qualquer dúvida.”

Por aqui se pode ver a importância de estar sempre bem informado. Os principais opositores da teoria atómica eram Ernst Mach e Wilhelm Ostwald.

<sup>10</sup> Pagels refere em *O Código Cósmico*, p.36, por exemplo, que:

“Quando [Einstein] foi proposto para membro da Academia Prussiana das Ciências, em 1913, a carta referia: «Em resumo, praticamente não se pode citar nenhum dos grandes problemas da física moderna ao qual Einstein não tenha dado uma notável contribuição. O facto de ele poder ter falhado o alvo em algumas das suas especulações, como, por exemplo, na sua hipótese dos *quanta* de luz, não pode realmente ser-lhe demasiado censurado, pois não é possível introduzir ideias verdadeiramente inovadoras no campo das ciências exactas sem correr um risco.»”

<sup>11</sup> A existência de *quanta* de luz foi confirmada em 1915 e em 1923 por Robert Millikan. E embora não houvesse nenhuma outra interpretação das experiências nem o próprio Millikan apoiou a hipótese dos *quanta* em 1915 (Millikan era, aliás, um dos mais fortes opositores da teoria dos *quanta* de luz). Só em 1923 é que os *quanta* foram realmente aceites pela comunidade científica. Refira-se que o nome de fotão só foi aplicado ao *quantum* em 1926 por Gilbert Lewis, tornando-se designação corrente após ter sido utilizado no título do Quinto Congresso Solvay: «Electrões e Fotões». Refira-se também que este congresso histórico, no qual participaram Einstein, Heisenberg, Bohr, Schrödinger, de Broglie, entre outros, foi onde ficou estabelecida a interpretação de Copenhaga (de que falaremos mais à frente) sendo talvez o mais famoso de todos os congressos da Fundação Solvay.

modifica apenas o número de electrões ejectados. Assim, parece óbvio que “a energia comunicada ao electrão é determinada pela frequência da luz e não pela sua intensidade; infelizmente, a frequência não tem qualquer relação com a energia na teoria ondulatória da luz.”<sup>12</sup>

?? Outra razão, pouco citada nos livros de divulgação, é a de que, segundo a visão ondulatória da luz, a energia que esta transmite aos electrões não está num ponto definido mas espalha-se numa área correspondente à amplitude da onda. À medida que a onda avança vai transmitindo a sua energia ao material em que incide. Deveria por isso haver um retardamento provocado pela absorção gradual da energia contida na onda de luz até que esta fosse suficiente para afastar o electrão do átomo a que se encontrava preso. Ora foi verificado que tal retardamento não existe.

Einstein veio remover todos estes problemas dizendo que a luz era constituída por um grande número de partículas. Mas como é que Einstein podia negar o carácter ondulatório da luz? Não podia, e, de facto, no seu artigo sobre o efeito fotoeléctrico, não sugeria que a luz não fosse uma onda.

A ideia de Einstein é que essas partículas de luz eram muito pequenas e mesmo a mais pequena quantidade de luz de que podíamos dispor era constituída por um número incrivelmente grande dessas partículas. Isto não parecia explicar muito bem porque é que as partículas haviam de aparecer em grupos com a forma de onda mas Einstein não achou o enigma impeditivo e, concentrando-se no aspecto da emissão e absorção de luz, verificou que esta teria indubitavelmente de ser constituída por partículas (fosse lá como fosse). O problema de saber porque é que as partículas parecem comportar-se como ondas enquanto viajam de um lado para o outro ainda hoje é motivo de polémica (uns dizem que é assim e pronto, outros dizem que há uma razão, embora as que se apontem hoje em dia pareçam ainda muito estranhas).

Einstein baseou-se no estudo de Plank para provar o carácter corpuscular da luz, dizendo que quando um determinado átomo emitia energia passando do estado  $nh\nu$  para  $(n-1)h\nu$  emitia um quantum de luz com energia  $h\nu$ . Assim a luz seria constituída por um grande número de pequenas partículas (mais tarde chamados fotões) cada uma com a energia correspondente à frequência da onda associada, isto é, respeitando a fórmula  $h\nu$ .<sup>13</sup>

Esta visão corpuscular da luz permite explicar o efeito fotoeléctrico de uma forma bastante simples.

Assim, a energia é transmitida aos electrões pelos fotões que, ao embater no electrão lhe transmitem, de forma imediata, toda a sua energia (isto é possível porque o fotão não é algo disperso no espaço), o que permite explicar a ausência de um retardamento.

Por outro lado, a energia transmitida a cada electrão depende, obviamente, da energia de cada fotão que lhe «cai em cima». Como a energia de cada fotão depende, não da intensidade da luz, mas da sua frequência, a energia recebida *por cada electrão* vai depender exclusivamente da

---

<sup>12</sup> *Quanta, Grãos e Campos*, p.56.

<sup>13</sup> Seguimos aqui, de forma simplificada, a explicação dada em *Física Quântica*, p.55.

frequência da onda de luz e não da sua intensidade. Ao aumentarmos a intensidade da luz vamos aumentar a quantidade de fotões que atingem os electrões. Vai assim haver mais electrões emitidos mas a energia com que eles são ejectados é a mesma.

É também fácil de explicar porque é que um feixe de luz de baixa frequência mas com uma grande intensidade, e, portanto, com uma grande energia total, pode não conseguir ejectar nenhum electrão. É que essa energia é devida a um grande número de fotões (o que explica a grande energia da onda de luz) todos com energias bastante baixas. Mesmo que estes fotões atinjam os electrões pode acontecer que não tenham energia suficiente para os arrancar das suas órbitas. Percebemos assim que feixes com uma energia total muito grande e baixa frequência podem não ser capazes de provocar o efeito fotoeléctrico enquanto que outros de mais baixa energia e alta frequência o provocam facilmente.

No entanto, a explicação da ligação entre conceitos tão diferentes como o de onda e partícula ficou por resolver. Como esse é um problema que nos irá acompanhar até ao fim não o iremos aprofundar aqui.

A importância que Einstein teve na evolução da física quântica é, sem dúvida, enorme. Pode-se dizer que ele é um dos «pais» da física quântica.<sup>14</sup> Além de ter introduzido a noção de dualidade onda-partícula e de ter alargado o campo da quantificação da energia – das trocas de energia à energia considerada em si mesma – muitos autores afirmam que ele foi o primeiro a compreender as consequências e o verdadeiro alcance das equações de Plank.<sup>15</sup>

### 3 – – **Átomos quânticos.**

#### II — 3 – .1 **O átomo de Rutherford.**

Vimos que, em 1905, Einstein tinha provado a existência dos átomos, fizera-o de uma forma bastante simples baseando-se no movimento browniano de um grão de pólen através do ar. Este movimento só era explicado por múltiplas e aleatórias batidas de átomos invisíveis no grão de pólen que o desviavam constantemente de uma trajectória rectilínea.<sup>16</sup>

Se este fenómeno provava indiscutivelmente a existência de átomos não nos dizia muito sobre a sua constituição interna. Em 1911 Rutherford, baseado em resultados de uma experiência que analisava as deflexões de partículas  $\alpha$  (átomos de hélio sem electrões) quando embatiam

---

<sup>14</sup> Recorde-se que, oficialmente, foi por este artigo que Einstein recebeu o prémio Nobel em 1921. Einstein deu, ainda nesta altura, outro importante contributo com um artigo sobre a teoria do calor específico dos corpos e no qual utilizava algumas ideias quânticas. Para outros detalhes ver por exemplo *Physics and Philosophy*, p.36 e *À Procura do Gato de Schrödinger*, p. 44.

<sup>15</sup> John Gribbin discute também este aspecto. Ver *À Procura do Gato de Schrödinger*, pp.42-43 e n. 9.

<sup>16</sup> O argumento de Einstein tinha já sido utilizado por outros físicos. O que Einstein trouxe de novo foi o tratamento matemático da ideia mais tarde comprovado experimentalmente por Jean Perrin. Cf. *À Procura do Gato de Schrödinger*, p.28, n.9(N.T.).



numa folha metálica fina, propõe um novo modelo atómico.<sup>17</sup> Segundo este modelo, o átomo seria composto por um núcleo, onde estaria toda a carga positiva do átomo, e electrões que giravam à sua roda. Esta imagem seguia por perto o conceito de órbita planetária. Assim, o electrão era visto como um pequeno planeta em volta do sol.

No entanto, este modelo não funcionava. Em primeiro lugar porque as leis de Newton estabeleciam que uma carga eléctrica em movimento acelerado devia emitir energia. Assim, se deixássemos um átomo entregue a si mesmo veríamos que depressa o electrão acabaria por perder energia (velocidade) acabando rapidamente por se despenhar no interior do átomo. Em segundo lugar, analisemos agora uma experiência imaginária: uma mão gigante envolve o nosso sistema solar, abana-o, aperta-o, contorce-o, etc. Não é preciso ser-se um génio para ver que ao fim de muito pouco tempo não restaria muito do sistema solar visto que este se apoia num equilíbrio relativamente frágil entre força centrífuga e força gravitacional.

Ora a experiência mostra-nos que os átomos são (na sua grande maioria) extremamente estáveis. Não andam para aí a explodir nem se destroem quando apertamos os dedos ou quando fazemos passar electricidade por um fio. Não podia ser portanto a força centrífuga que mantinha os electrões afastados do núcleo.

## II — 3 — .2 *Bohr, átomos e postulados.*

Em 1913 Bohr, um jovem físico recém doutorado que se entregava ao seu primeiro trabalho, vai elaborar um modelo que tenta explicar a estabilidade dos átomos. Este modelo atómico apresentava uma série de postulados *ad hoc* que acrescentavam aos conceitos clássicos de órbita, carga, etc., uma série de peculiaridades tiradas das novas ideias de Plank e Einstein. Eram assim a tentativa de aplicar aos modelos clássicos as particularidades dos *quanta* de energia. Seguindo a ordem apresentada no livro *Física Quântica*,<sup>18</sup> vamos aqui apresentá-los:

1 – Os electrões, devido à sua carga, movem-se em torno do núcleo em órbitas circulares obedecendo às leis da física clássica.

2 – Destas órbitas só algumas são possíveis. A saber, aquelas em que o momento angular do electrão (a sua «altura») é um múltiplo inteiro de  $h/2\pi$ .

3 – Embora esteja constantemente acelerado um electrão numa destas órbitas não emite radiação electromagnética (ao contrário do que dizem as leis da física clássica). Portanto a sua energia permanece constante.

4 – É emitida radiação electromagnética se o electrão muda de uma órbita de maior energia para uma órbita de menor energia.

---

<sup>17</sup> Novo em relação ao modelo de Thompson que apresentava o átomo como tendo a carga positiva distribuída uniformemente em seu torno entremeada com cargas negativas.

<sup>18</sup> p.138.

Assim, os electrões andavam à volta do núcleo mas não emitiam qualquer energia neste seu movimento; um átomo só podia emitir ou absorver energia em quantidades bem definidas (*quanta*) e para haver uma mudança de órbita do electrão teria de haver emissão ou absorção de energia (em forma de fotões) conforme este se aproximasse ou se afastasse do núcleo. Isto fazia com que só algumas órbitas fossem possíveis para os electrões. Estes mudavam, instantaneamente, de uma órbita para outra de forma descontínua, isto é, sem passar pelo espaço intermédio. Uma órbita elíptica seria assim completamente impossível a um átomo Bohreano.

Apesar de ser uma junção de ideias clássicas e quânticas e de muitos dos seus pressupostos terem poucas bases científicas, o átomo de Bohr mostrou que realmente a quantificação do átomo era a explicação correcta para a sua estabilidade. De facto, o átomo de Bohr teve um tal poder explicativo sobre fenómenos até aí muito mal compreendidos que foi aceite quase sem reservas pela comunidade científica.

O modelo de Bohr explicava isto de uma forma bastante simples. Como vimos afirma que um átomo só emite luz quando um dos seus electrões muda de órbita. A frequência do raio de luz que esse electrão emite corresponde à mudança de órbita que ele efectua. Ora como nem todas as órbitas são possíveis também só determinadas frequências serão emitidas.

Bohr pode calcular, a partir do modelo, as frequências emitidas por átomos muito simples como o hidrogénio tendo as previsões concordado com os resultados experimentais.

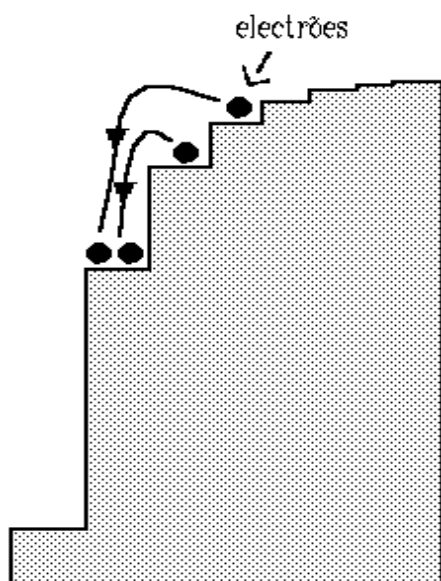
Mais tarde Sommerfeld veio a introduzir grandes melhorias no modelo atómico de Bohr, de tal forma que este modelo de átomo é por vezes referido como o de Bohr-Sommerfeld. Uma das inovações foi a conjugação com a teoria da relatividade restrita de Einstein,<sup>19</sup> o que permitiu explicar o chamado espectro fino, descoberto depois de 1916, e a quantificação de outro tipo de órbitas como as elípticas.<sup>20</sup>

A ideia essencial, no entanto, manteve-se. O electrão tinha órbitas bem definidas e saltava de uma para as outras soltando quantidades de energia bem definidas. Isto pode ser representado no seguinte diagrama:

---

<sup>19</sup> Cf. Paul Couderc, Frederic Perrin, *A Relatividade*, Trad. Franco de Sousa, Edições 70, colecção Biblioteca Básica da Ciência, Lisboa, s.d., p.82.

<sup>20</sup> O átomo de Bohr permitiu explicar outras coisas além da estabilidade atómica e dos riscos espectrais. Teve, por exemplo, bastante importância no esclarecimento das ligações químicas entre os átomos. Para detalhes não matemáticos sobre o assunto ver uma análise interessante em, *À Procura do Gato de Schrödinger*, pp.47-50 e 58-62.



Embora o átomo de Bohr permitisse explicar uma grande quantidade de fenómenos, revestia-se ainda de alguns problemas. Uma das questões que se punha era saber o que provocava a descida de um electrão em direcção ao núcleo e, portanto, a emissão de luz. Einstein, em 1916, vai conseguir resolver este problema recorrendo às técnicas estatísticas de Boltzmann e ao raciocínio empregue no estudo das desintegrações radioactivas.

Conseguiu assim prever a probabilidade de certas transições ocorrerem embora não tenha explicado o motivo porque cada uma delas se dava (tal como não havia um motivo para se dar, num certo momento, a desintegração radioactiva). Mesmo assim o estudo de Einstein foi importante e Bohr, baseado nas conclusões de Einstein, conseguiu explicar a intensidade de certas riscas espectrais pela maior probabilidade que tinham de ocorrer.

O átomo de Bohr, embora conseguisse realizar uma união entre ideias clássicas e quânticas, continha um grande número de imperfeições, e as previsões teóricas que fornecia, quando aplicado a átomos mais complexos, apresentavam sérias discrepâncias com os resultados experimentais.

Em 1925 tinha-se já verificado que seria necessária uma renovação profunda dos conceitos clássicos e a formulação totalmente nova de um modelo atómico abandonando muitas das ideias clássicas.

Estas ideias surgiram de dois estudos com orientações bem distintas. Um que afirmava a dualidade onda-corpúsculo que se aplicava agora a todas as partículas da natureza. Uma outra que

Neste diagrama vêm-se electrões saltando para degraus (que representam órbitas) mais baixos. Quanto mais baixo é o degrau mais perto o electrão está do núcleo e maior é a quantidade de energia emitida ou absorvida para que o electrão desça ou suba o degrau. A energia necessária pode ser calculada segundo a fórmula:

$$E_t = h/n^2$$

em que  $h$  é a constante de Plank,  $n$  é o número do degrau a contar do nível mais baixo e  $E_t$  representa a quantidade de energia necessária à transição.<sup>21</sup> Assim só nos primeiros degraus se assistirá a uma descontinuidade orbital pronunciada. Os degraus mais afastados do núcleo serão praticamente imperceptíveis sendo a variação de órbita feita de forma quase contínua.

<sup>21</sup> O diagrama e a explicação são tirados de *À Procura do Gato de Schrödinger*, pp.53-54.

explicava o mundo atómico sem recorrer a qualquer tipo de imagens e negando a possibilidade de se descrever este estranho mundo através dos nossos conceitos. Estas duas abordagens deram origem àquilo que hoje é chamado mecânica quântica.

Síntese

### III — Mecânica Quântica.

#### 1 — Ondas e corpúsculos.

Em 1924 Louis de Broglie, um nobre francês bastante interessado pelos problemas da física apresentou, como tese de doutoramento, uma teoria sobre a matéria que iria marcar a ruptura definitiva com a física clássica.

Segundo a sua teoria todas as partículas de matéria teriam um carácter ondulatório e corpuscular. Assim um fóton teria uma onda associada assim como o electrão ou qualquer outra partícula de massa suficientemente pequena para que se pudesse notar o efeito ondulatório.

A ideia original era a de que se uma onda de luz podia ser considerada como constituída por muitos fótons então talvez todas as corpúsculos possuíssem uma onda associada. Por outro lado esta ideia permitiria explicar porque é que só certas órbitas electrónicas seriam possíveis no interior dos átomos.

Bohr tinha postulado que as órbitas dos electrões só podiam assumir certos valores inteiros. Do ponto de vista ondulatório isto é perfeitamente justificável se virmos o electrão como uma onda que se move à roda do átomo.

Podemos entender melhor este aspecto se imaginarmos um exemplo contido no livro *Quanta, Grãos e Campos*:<sup>22</sup> Imaginemos uma corda com uma extremidade presa a uma árvore segurando nós a outra extremidade. Podemos fazer oscilar a corda. A princípio pode ser um pouco difícil mas é possível arranjar um ponto de equilíbrio de forma a que a corda oscile facilmente e a nós não seja preciso senão dar um ligeiro movimento com a mão. Isto acontece porque o número de ondas que vai desde a nossa mão até à outra extremidade é um número inteiro. Se isto não acontecesse a onda que seria reflectida pela ponta da corda amarrada à árvore iria opor-se à nossa acabando por desconjuntar a oscilação.

A visualização do electrão como uma onda possibilitar-nos-ia compreender porque é que só algumas órbitas poderiam ser preenchidas pelos electrões. De facto, se um electrão tem uma onda associada caracterizada por um determinado comprimento de onda, só serão possíveis as órbitas na qual o número de ondas por volta que o electrão dá ao átomo seja um número inteiro. Não se trata assim de um postulado mas de uma consequência que se deduz do carácter ondulatório do electrão. É preciso agora provar que ele tem realmente esse carácter ondulatório. Mas analisemos agora alguns passos que de Broglie deu para chegar à sua equação.

Sem analisar muito profundamente a estrutura matemática que de Broglie utilizou para provar esta ideia podemos seguir, de forma simplificada, alguns dos seus passos.

---

<sup>22</sup> pp.79-82.

Em 1916 Einstein verificou que os fotões seriam capazes de transmitir uma certa quantidade de movimento à estrutura atómica. Para isso partiu da sua famosa equação a que chegou no âmbito da relatividade restrita e segundo a qual:

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

Em que E = energia, m = massa em repouso, c = velocidade da luz e p = momento da partícula (massa(Kg) × velocidade(m/s)). Como a massa em repouso de um fotão é nula pode escrever-se  $E^2 = p^2 c^2$  ou  $p = E/c$ . Como E, pela fórmula de Plank, é igual a hv podemos escrever:

$$p = hv/c \tag{1}$$

Foi apoiando-se nesta fórmula que de Broglie foi capaz de calcular o comprimento de onda para uma qualquer partícula com um determinado momento.<sup>23</sup> Ora, como o comprimento de onda, expresso pela letra grega λ (lambda), multiplicado pela frequência da onda, n, nos dá a velocidade a que a onda se desloca, ficamos, no caso da radiação electromagnética, com  $\lambda v = c$  ou  $\lambda v c^{-1} = 1$ . Multiplicando ambos os termos por h ficamos com  $\lambda h v c^{-1} = h$  o que, conjugado com [1], pode ser escrito:

$$\lambda p = h$$

ou, de outra forma

$$\lambda = h p^{-1} \tag{2}$$

Estamos agora em condições de calcular, por exemplo, a onda associada a uma bala de 10g e que se move a uma velocidade de 100 m/s. Utilizando [2] sabemos que:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6,6 \times 10^{-34} \text{ joule/s}}{0,01 \text{ Kg} \times 100 \text{ m/s}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 6,6 \times 10^{-34} \text{ m} = 6,6 \times 10^{-24} \text{ \AA}$$

O que é um comprimento de onda extremamente curto. Para ter uma ideia do tamanho desta onda podemos compará-la com o diâmetro do electrão: ela é mil milhões de vezes mais pequena (o raio do electrão é de cerca de  $2,8 \times 10^{-15}$  m).

Podemos também calcular o comprimento de onda de um electrão com uma energia cinética de 100 eV (electrões volt),<sup>24</sup> neste caso:

<sup>23</sup> Sigo de perto a explicação que é dada em *À Procura do Gato de Schrödinger*, pp. 66,69-70. Devo, no entanto, notar que a fórmula não pode ter sido deduzida de uma maneira tão simples o que limitaria a sua validade a partículas com massa em repouso nula (caso dos fotões mas não dos electrões).

<sup>24</sup> Este exemplo segue literalmente o exemplo apresentado no livro *Física Quântica*, p.88.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{(2mK)^{1/2}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{6,6 \times 10^{-34} \text{ joule/s}}{(2 \times 9,1 \times 10^{-31} \text{ Kg} \times 100 \text{ eV} \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ joule/eV})^{1/2}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{6,6 \times 10^{-34} \text{ joule/s}}{5,4 \times 10^{-24} \text{ Kg-m/s}} = 1,2 \times 10^{-10} \text{ m} = 1,2 \text{ \AA}$$

Este comprimento de onda pode já ser medido. Para isso precisamos de aberturas de diâmetro igual ou menor que o comprimento de onda que queremos medir. Nestas circunstâncias os electrões exibem um efeito de interferência tal como as ondas de luz na experiência de Young. Mas como conseguir aberturas tão pequenas?

De Broglie sabia que bastava emitir um feixe de electrões sobre um cristal e estudar a difracção dos electrões. Nestes materiais os átomos estão separados por distâncias relativamente precisas e as aberturas entre eles servem de buracos por onde o feixe de electrões terá de passar. Como estas aberturas são muito estreitas notar-se-á, à saída do cristal, uma figura de difracção provocada pela interferência das ondas electrónicas.

Uma tal experiência tinha já sido feita em 1922-23, mostrando o efeito de interferência. Este efeito, que na altura não tinha sido compreendido, não tinha chegado ao conhecimento de de Broglie. Por isso, durante algum tempo, a tese de de Broglie foi considerada como um artifício matemático.

Einstein, a quem o orientador de de Broglie tinha mandado uma cópia do trabalho do seu aluno, não teve no entanto a mesma opinião, divulgando a ideia a outros cientistas. Rapidamente se descobriu que a experiência que provava o efeito de difracção previsto pela teoria de de Broglie já tinha sido realizado com êxito em experiências efectuadas por Davisson e Kunsman. No entanto os experimentadores tinham atribuído o efeito de difracção à própria estrutura atómica e não às propriedades dos electrões. Só em 1927 é que se fizeram estudos mais precisos que comprovaram inequivocamente a existência de ondas electrónicas.<sup>25</sup>

---

<sup>25</sup> John Gribbin salienta um aspecto curioso, estas experiências foram feitas por duas equipas independentes: Davisson e Lester Germer, nos Estados Unidos, e George Thompson e Alexander Reid, em Inglaterra, partilhado ambas as equipas o prémio Nobel da Física em 1937. Assim, “J.J. Thompson recebeu o Nobel ao demonstrar que os electrões eram partículas. E em 1937 viu o seu filho receber o mesmo galardão por provar que os electrões eram ondas.” (*À Procura do Gato de Schrödinger*, p.71).

## 2 – – Ondas de Schrödinger.

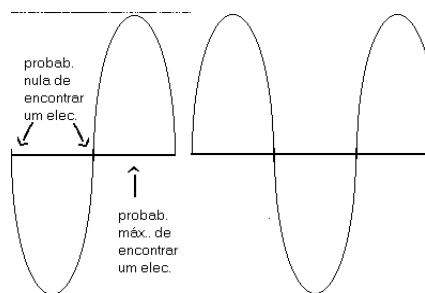
Schrödinger soube da ideia inovadora de de Broglie através de Einstein. As fórmulas de de Broglie, embora tivessem implicações que teriam de reformular os conceitos básicos da física, só se podiam aplicar a ondas com frequência constante, sem estarem sujeitas a forças vindas do exterior, etc. Para calcular eficientemente o comportamento das ondas electrónicas no interior do núcleo ou movimentando-se entre os átomos de uma estrutura cristalina era preciso desenvolver as equações.

É isto que Schrödinger vai fazer introduzindo uma fórmula que é talvez uma das mais fundamentais da física quântica e que é chamada por função  $\psi$  (psi). A fórmula que esta letra representa é contudo demasiado complexa para a introduzirmos aqui. É no entanto preciso referir que envolve números imaginários tendo a sua solução uma parte real e uma parte imaginária. É portanto uma onda bastante diferente da onda de de Broglie. Além disso esta onda também não parece ser uma onda material no sentido em que estamos habituados a concebê-las. Por exemplo uma onda que envolva uma partícula tem três dimensões, mas se envolver duas partículas já tem seis, com três partículas tem nove dimensões, etc.

A princípio Schrödinger tinha a esperança de que, aplicando o modelo ondulatório ao átomo poderia explicar de uma forma menos estranha as suas peculiaridades. De facto, embora tenha sido publicada depois das teorias de Heisenberg, a mecânica ondulatória (como depois ficou a ser conhecida) teve um grande sucesso pois fornecia um modelo mais visualizável do átomo.

No entanto, à medida que se ia aperfeiçoando o modelo percebeu-se que certas noções como as de saltos entre as órbitas teriam de se manter.

Mais tarde Born deu uma nova interpretação das ondas de Schrödinger dizendo que elas expressavam a probabilidade de se encontrar um determinado electrão numa certa parte da onda. Assim, nos sítios onde a intensidade da onda fosse maior teríamos mais probabilidade de encontrar um electrão. Nos sítios onde essa intensidade fosse nula não poderíamos encontrar qualquer electrão.



Interpretação estatística de Born, o electrão só pode ser encontrado no eixo da onda onde a intensidade seja maior que zero. O quadrado da intensidade da onda dá nos a probabilidade de encontrar um electrão.

Esta onda, como podemos ver, vem complicar ainda mais as coisas, pois não se vê muito bem como é que uma onda pode dar unicamente a probabilidade de um electrão, ou um fóton, se encontrar num determinado sítio. De facto, se as ondas interferem entre si, é porque se espalham realmente pelo espaço. Portanto uma onda não é algo de confinado a um ponto como o electrão que tem um raio fixo. Ela aumenta e diminui de volume e isso é sentido no efeito de interferência. Por outras palavras a onda deve ter uma realidade qualquer e é por isso mesmo que temos que a representar numa fórmula matemática para que as previsões condigam com as observações.

Parece pois que essa onda existe realmente, mas é muito difícil de imaginar como seja. E tão difícil, ou mais ainda, é explicar porque é que nunca se deixam apanhar. Isto é, podemos imaginar uma onda estacionária à volta do electrão (o que é uma má tentativa visto que essa onda é inimaginável). Mas o que vemos nas chapas fotográficas e nos fotomultiplicadores nunca são ondas, são partículas. Isto leva a pensar que a partícula ou está de alguma forma espalhada por toda a onda e, quando é feita uma medição, se concretiza num determinado ponto, ou existe sempre num estado bem localizado sendo conduzida, de alguma forma, pela onda que a ela está associada.

Um outro aspecto importante da mecânica ondulatória de Schrödinger é que nos dá apenas a probabilidade de um acontecimento se vir a verificar ou não (por exemplo encontrarmos um electrão num determinado espaço). A consequência imediata é que só podemos prever com alguma certeza acontecimentos que envolvam um grande número de partículas. Para uma só partícula o que temos é uma curva de probabilidades e não há maneira, seja qual for o método usado, de sabermos o que ela irá fazer exactamente. Por outras palavras, existe um grau de incerteza que não podemos evitar. Mas falaremos disso mais à frente.

### 3 – – **Mecânica Matricial.**

Acabámos de ver o que é hoje designado por mecânica ondulatória, que, partindo da ideia de de Broglie é desenvolvida por Schrödinger e cuja característica principal é analisar os electrões sob o seu aspecto ondulatório.

Seguindo um caminho completamente diferente, Heisenberg vai chegar ao que se chama hoje mecânica matricial. Como já vimos, Schrödinger procurava uma forma de «ver» o que se estava a passar no interior do átomo. Pelo contrário a matemática utilizada por Heisenberg para explicar o mundo atómico nada tem a ver com descrições ondulatórias ou corpusculares. Ela possibilita escrever uma função de probabilidade, baseada no conhecimento que temos dos fenómenos, dando uma determinada previsão de resultados. Mas não descreve o que se passa entre duas observações.

Heisenberg já trabalhava neste problema à algum tempo, na verdade a sua investigação prendeu-se, desde o início, com os problemas atómicos. Nas «férias da Páscoa» de 1924 Heisenberg parte para o Instituto Niels Bohr, em Copenhaga, a convite do próprio Bohr. Aí



estavam reunidos cientistas de todo o mundo tentando dar forma à revolução da física que todos sabiam ter de se dar, mais cedo ou mais tarde. No entanto, e apesar dos esforços, Heisenberg não conseguia grandes progressos. Estava contudo convencido que se podia dispensar a visualização do que se passa no interior do átomo. Em Maio de 1925 Heisenberg adoecce com a febre dos fenos e vai convalescer para uma pequena ilha do mar do Norte chamada Heligolândia.

Foi aqui que Heisenberg conseguiu, pela primeira vez, um esboço do que mais tarde ficou conhecido como mecânica das matrizes. Nesta mecânica só contam as variáveis que podem ser observadas através de experiências, outra particularidade é que utiliza um tipo de matemática, chamada matemática das matrizes, que faz com que a multiplicação entre tabelas seja não comutativa. Por outras palavras,  $a \times b \neq b \times a$ . Isto, a princípio, foi um resultado inesperado para Heisenberg mas em breve adquiriria o seu verdadeiro sentido.

Depois de regressar ao continente, Heisenberg revelou os seus resultados a Born e Pascual Jordan. Alguns meses depois os três físicos tinham já conseguido elaborar uma teoria matemática que podia ser submetida à experiência.

Dirac, que tomou conhecimento da teoria de Heisenberg apenas em Julho de 1925, conseguiu sozinho, elaborar um artigo onde explicava e desenvolvia a mecânica das matrizes dando já o relevo merecido à não comutatividade. Mais tarde Dirac vai desenvolver uma álgebra própria, chamada Álgebra Quântica, que, segundo Gribbin, “contêm em si a mecânica das matrizes mas vai mais além.”<sup>26</sup>

### III — 3 – .1 *O princípio da incerteza.*

Uma das principais características da mecânica matricial de Heisenberg é, como já referimos, a não comutatividade da multiplicação de matrizes. De uma forma simplificada podemos dizer que o resultado da multiplicação do vector correspondente ao movimento pelo vector correspondente à velocidade de uma partícula depende da ordem em que são multiplicados. Partindo da não comutatividade da multiplicação de matrizes Heisenberg conseguiu chegar ao princípio de incerteza. Esta relação pode ser quantificada dizendo que

$$qp \times pq = h2\pi/im$$

em que  $i$  é o número imaginário  $\sqrt{-1}$ . A partir desta equação Heisenberg chega à conclusão que existe sempre uma incerteza fundamental no conhecimento da velocidade e posição de uma partícula. O mesmo se aplica ao par energia, tempo. Se diminuirmos muito o tempo em que efectuamos uma observação a precisão com que medimos a energia vai diminuir. O mesmo acontece em relação à velocidade e momento de uma partícula. O que se pode escrever dizendo que:<sup>27</sup>

---

<sup>26</sup> À procura do Gato de Schrödinger, p.82

<sup>27</sup> A letra  $\Delta$  (delta) utiliza-se porque falamos de um conjunto de medições e não de uma medição individual. De facto uma medição individual não nos possibilitaria saber qual a margem de erro com que efectuamos a medição. Medindo outra vez o mesmo objecto em condições semelhantes chegamos a resultados mais ou menos parecidos. Se chegarmos sempre ao mesmo resultado é

$$\Delta q \times \Delta p \geq h$$

$$\Delta e \times \Delta t \geq h$$

É importante compreender que o princípio da incerteza é uma questão de princípio sendo uma consequência lógica da própria teoria e não das dificuldades relacionadas com a observação.

Na introdução, ao explicar o princípio da incerteza, verificámos que para conhecer um objecto é preciso medi-lo, e para isso tem de se actuar sobre ele. No entanto parece agora que as coisas se complicam. Sabemos já que, nas nossas observações, nunca podemos saber a posição e a velocidade exactas de uma partícula, mas não sabemos ainda se isso se aplica apenas ao conhecimento que temos das coisas ou se deriva do facto de as coisas em si mesmas não terem uma posição definida. Essa é a parte de interpretação da teoria, a parte que analisaremos em seguida.

---

sinal de que a medição foi feita correctamente, se não for esse o caso então a diferença entre as várias medições dar-nos-á o grau de exactidão da medição.

## **II — PERSPECTIVAS FILOSÓFICAS**

1 –

## I — Introdução

Se pegarmos num livro de divulgação que aborde as várias interpretações que ao longo das últimas décadas se têm feito sobre a física quântica, poderemos ver que o consenso é pouco ou nulo entre as várias interpretações. Se de seguida lermos outro livro sobre essas mesmas interpretações encontraremos, com grande probabilidade, uma perspectiva diferente daquela que tínhamos lido anteriormente. Ou seja, não há consenso nem em relação a qual deva ser a interpretação correcta da física quântica, nem em relação às interpretações da física quântica. Assim, é natural encontrarmos dois apoiantes da interpretação de Copenhaga defendendo coisas diferentes.<sup>28</sup>

Movemo-nos pois num terreno em que as certezas são difíceis de encontrar, e, se queremos dar uma visão global dos principais problemas e interpretações que se põem quando falamos de física quântica, teremos de falar brevemente sobre cada uma delas sem nos determos muito sobre problemas específicos que envolvem.

É no entanto de frisar que a maioria dos físicos não parece estar muito preocupada com os problemas de interpretação. A mecânica quântica exhibe uma correcção notável em todas as suas previsões. Através dela construíram-se lasers, explica-se o funcionamento dos transístores, constroem-se microscópios que são capazes de observar os átomos, explicam-se certas peculiaridades da matéria a muito baixas temperaturas (próximas do 0 absoluto), as acções entre diversas partículas, etc. Portanto por aqui não podemos criticar muito a teoria dos quanta. Mesmo as interpretações alternativas da teoria tentam chegar às mesmas previsões!

Portanto, dentro de uma perspectiva pragmática, não há grandes dificuldades. E é esta perspectiva pragmática que tem orientado a física desde a revolução de Galileu. Separemos bem a física da filosofia e da religião, tentemos obter resultados correctos, pelas fórmulas mais simples e não tentando o acordo com uma imagem do mundo preestabelecida. De acordo com esta visão, se os resultados experimentais são os previstos e se a teoria é a única que os pode explicar, então não podemos fugir às consequências filosóficas, por muito que nos custe a aceitá-las.

Até Galileu as implicações filosóficas e teológicas eram as mais importantes para a construção da nossa visão do mundo. A partir de Galileu a visão que temos do mundo é continuamente verificada pela experiência que temos dele. Se a experiência corrobora as nossas previsões mantemos os nossos modelos, se não confirma, teremos então de os alterar até que se adequem à realidade.

Mas, no caso da física quântica, mesmo que quiséssemos substituir os nossos modelos da matéria por outros mais perfeitos não poderíamos.

---

<sup>28</sup> Gostaria de referir que, depois de se saber algo sobre física quântica a leitura do livro *O Átomo Assombrado*, se revela de extraordinária importância pois permite perceber a confusão que ainda hoje (o livro foi publicado em 1986) se sente em redor dos problemas levantados pela física quântica.

O modelo de mundo que a física quântica nos dá é substancialmente diferente da proporcionada pela física clássica. Podíamos objectivar facilmente os resultados das equações da física clássica, sabíamos sempre o que se estava a passar. Se as equações nos davam uma forma mais simples e correcta (podíamos provar a sua exactidão através de experiências) de ver o mundo, então era essa imagem do mundo que estava correcta e não as anteriores. Se estava errada podíamos alterar os nossos modelos de modo a visualizar os acontecimentos de uma outra forma.

Mas na física quântica certos conceitos como a objectividade, a causalidade local ou o nosso próprio modo de pensar são postos em causa. A interpretação dos criadores da física quântica diz-nos que não podemos imaginar o que se passa no mundo atómico pois não é nada de parecido com tudo o que pudemos observar até agora. Mas então qual a conclusão? O mundo atómico é invisualizável ou irracional?! Chegámos aos limites possíveis do conhecimento que temos das coisas ou podemos aprofundá-lo mais por intermédio de novos conceitos?

A teoria está errada ou certa? Actualmente podemos dizer que está correcta, e no futuro? E a interpretação que se dá à teoria, estará ela também correcta? A essa pergunta temos muitas respostas alternativas; muitas interpretações, muitas objecções. Há uma coisa, no entanto, de que ninguém tem dúvidas, a física quântica veio revolucionar completamente o nosso modo de pensar. As consequências dessa revolução não estão ainda completamente clarificadas mas é indubitável que algo terá de mudar.

## II — A interpretação de Copenhaga

“ — *Pensa que a interpretação de Copenhaga é ainda a perspectiva oficial?* “

“ — Bem, em primeiro lugar, gostava de pôr as minhas objecções à utilização da expressão «interpretação de Copenhaga».”

“ — *E porquê?* “

“ — Porque parece pressupor a existência de várias interpretações da mecânica quântica. Existe apenas uma. Só é possível compreender a mecânica quântica de uma maneira. Há muitas pessoas a quem isso não satisfaz inteiramente e tentam encontrar outras vias. Mas até à data ainda ninguém surgiu com algo de consistente. Por isso, quando alguém se refere à interpretação de Copenhaga quer realmente falar da mecânica quântica. Portanto a maioria dos físicos não emprega essa expressão; é sobretudo utilizada por filósofos.”<sup>29</sup>

A interpretação de Copenhaga deve a sua existência a Bohr e Heisenberg, que, após múltiplas discussões no Instituto Niels Bohr (em Copenhaga) que se prolongaram por mais de um ano, chegaram a uma formulação coerente do significado da física quântica. No entanto, desde

---

<sup>29</sup> *O Átomo Assombrado*, p.98, parte da entrevista a Sir Rudolf Peirls, que ocupava até 1974 a cátedra Wykeham de Física da Universidade de Oxford.

logo esta interpretação levantou uma grande polémica tendo cientistas como Einstein e de Broglie, entre outros, levantado sérias dúvidas em relação à validade da interpretação.

Quer Bohr quer Heisenberg defendiam a posição de que os conceitos que utilizamos na nossa vida quotidiana e que servem de base à física clássica perdem a sua validade no domínio do muito pequeno. Assim, tal como a relatividade restrita de Einstein quebrou os conceitos tradicionais de espaço e tempo também a física quântica nos mostraria que não podemos conceber a posição e a velocidade de uma partícula ao mesmo tempo pois estes conceitos são mutuamente exclusivos.

Esta posição foi suscitada pelos muitos problemas que se enfrentaram para alcançar um bom sistema que explicasse, por exemplo, a estabilidade do núcleo. O carácter ondulatório e corpuscular são também um bom exemplo. Podemos constatar a existência de fótons e electrões e podemos também constatar o carácter ondulatório associado à sua movimentação. Mas como unir as duas representações numa só?

Foi a trabalhar em problemas como este que uma nova geração de físicos achou que as leis clássicas em que a ciência se tinha apoiado tinham agora de ser substituídas,<sup>30</sup> pelo menos nos

---

<sup>30</sup> Heisenberg, no livro *Diálogos Sobre Física Atómica*, pp.54-55, apresenta várias conversas que foi tendo ao longo da sua vida e que espelham muitas das situações vividas na evolução da física quântica. Numa conversa tida com Wolfgang Pauli (a quem devemos, por exemplo, o princípio da exclusão) enquanto eram alunos da Universidade de Munique, Heisenberg e Wolfgang discutem o conceito de órbita electrónica no seio do átomo e a possibilidade de se poder visualizar o que acontecia no interior do átomo. A dada altura Heisenberg afirma:

“Se existe, pois, uma trajectória do electrão na câmara de nevoeiro, também deve haver uma órbita no átomo. Mas confesso que também me surgiram dúvidas. Isto porque calculamos uma órbita em conformidade com a mecânica clássica de Newton e depois lhe atribuímos, pelas condições quânticas, uma estabilidade que justamente, segundo esta mesma mecânica, ela jamais possuiria; e se o electrão, na radiação, salta de uma órbita para outra, como se afirma, então é preferível que nada digamos sobre o que acontece, se um salto em altura, se em comprimento, se outro capricho qualquer. Quer dizer, redundaria num absurdo toda a representação de uma órbita do electrão dentro do átomo. Mas que dizer então?”

Alguns dias depois Heisenberg teve a possibilidade de conversar pela primeira vez com Bohr. Ao confrontar estas ideias com Bohr, Heisenberg pôde constatar que este seguia um ponto de vista semelhante (pp.60-61):

“Até aqui, na física ou em qualquer outra ciência, quando se pretendia explicar um fenómeno novo, podia tentar-se através da utilização dos conceitos e métodos preexistentes, reduzir o novo fenómeno aos fenómenos ou leis já conhecidas. Mas na física atómica sabemos que os conceitos anteriores já não são suficientes. Por causa da estabilidade da matéria, a física newtoniana não tem uma aplicação exacta no interior do átomo; quando muito pode fornecer um ponto de apoio. Daí que não possa haver tão-pouco uma descrição intuitiva da estrutura do átomo, porque tal descrição – justamente por ter de ser intuitiva – deveria utilizar os conceitos da física clássica, que não afectam já o processo. Sabe que com uma teoria dessas se tenta provavelmente algo impossível. Isto porque devemos pronunciar-nos sobre a estrutura do átomo, mas não possuímos a linguagem conveniente para nos fazermos entender.(...) Nesta situação, uma teoria não pode de maneira nenhuma *aclarar* qualquer coisa, no sentido que é usual na ciência. (...) Espero que elas [as imagens dos átomos] descrevam bem a estrutura dos átomos mas apenas tão bem quanto é possível na linguagem intuitiva da física clássica. Temos de esclarecer o facto de que a linguagem só aqui pode ser utilizada de forma semelhante à poesia uma vez que não se trata de exprimir com precisão dados objectivos, mas sim suscitar imagens na consciência do ouvinte e estabelecer ligações simbólicas.”

casos onde o carácter descontínuo da energia tivesse algum peso. Estes casos eram tão estranhos que não temos qualquer possibilidade de os visualizar, e isto porque os nossos conceitos, desenvolvidos a partir dos acontecimentos que vemos desenrolar no dia-a-dia e base de toda a física clássica, têm um campo de validade muito pequeno. Podemos descrever o que se passa no interior do átomo como um electrão que anda à volta do núcleo em certas órbitas ou como uma onda estacionária que o circunda. Ambas as imagens são correctas e falsas. Podemos utilizar, conforme os casos, uma ou outra, ou então uma seguida da outra. A forma que utilizarmos depende do aspecto específico do átomo que queremos analisar. No entanto nenhuma das imagens, por si só, é válida e também não podemos utilizar as duas ao mesmo tempo e, consequentemente, não podemos imaginar o que se passa no interior do átomo pois não temos nenhum conceito que lhe corresponda.<sup>31</sup>

Por outro lado a física tem evoluído devido aos problemas que se lhe foram pondo, às dificuldades que teve de superar modificando certos conceitos chave de forma por vezes radical. Parece então plausível considerar que estamos perante uma situação transitória e que mais cedo ou mais tarde encontraremos um conceito que se possa aplicar sem limitações ao mundo atómico.

Segundo a teoria quântica não podemos. Já que os conceitos que utilizamos para falar e para pensar foram adquiridos ao longo de muito tempo, eles fazem parte da estrutura do raciocínio do próprio homem, algo que não podemos abandonar.<sup>32</sup> Até agora o homem tinha uma grande confiança nas possibilidades do seu conhecimento, mas isto só acontecia porque esse conhecimento era aplicado em domínios de onde a nossa própria maneira de pensar surgiu. Não é pois de admirar que tenham dado resultados positivos. Mas agora, que chegamos a novos domínios com os quais o homem nunca tinha tido qualquer contacto e escaparam sempre à sua experiência, perdemos a capacidade de os compreender completamente. Podemos assim analisar o mundo atómico em termos de ondas ou corpúsculos (algo que estamos habituados a ver) mas eles não correspondem nem a uma coisa nem a outra.

---

É importante perceber porque é que se abandonou a hipótese de se visualizar o que se passava no interior do núcleo atómico pois esta posição limita bastante o nosso campo de investigação, e, ao invés de consistir uma nova conquista conceptual, pode ser também encarada como uma forma de fechar os olhos a paradoxos que precisavam de ser encarados de frente.

<sup>31</sup> Cf. *Physics and Philosophy*, pp.49-50. É de notar que se pode estabelecer uma certa semelhança entre o mundo atómico de Niels e Bohr e a coisa em si kantiana. A impossibilidade da aplicação dos conceitos a um indeterminado que, no entanto, só conseguimos entender através deles, é a mesma, embora a posição de Kant me pareça mais bem fundamentada.

<sup>32</sup> Tentei aqui seguir a (curta) argumentação de Heisenberg exposta em *Physics and Philosophy*, pp.55-56. Heisenberg remata com a seguinte citação de von Weizsäcker: "Nature is earlier than man, but man is earlier than modern science." Não posso deixar de notar que o tipo de argumentação aqui utilizado (os conceitos adquirem-se através de experiências logo, podemos encontrar um tipo de experiência ao qual os nossos conceitos não se adequam) é extremamente criticável e apoia-se em pressupostos com exactidão que não me parece suficiente para servir de suporte a uma visão desta natureza.

E, se temos essas imagens do mundo atômico, um mundo que nunca observámos directamente, é porque tentámos encaixar os resultados das nossas observações nesses conceitos que, no entanto, não lhe são adequados. A relação que ilustra isto com mais clareza é a relação de incerteza.

Podemos definir o electrão como sendo um corpúsculo ou uma onda. Qualquer destas imagens é deficiente. No entanto não conseguimos uma aproximação melhor. Podemos então utilizar estas imagens mas sabendo que elas não estão totalmente correctas. O princípio de incerteza, ao impedir, por exemplo, uma descrição exacta da posição do electrão impede-nos de cair no erro de o considerar numa posição bem definida.<sup>33</sup>

Mas o electrão não está numa posição bem definida? Só segundo os nossos conceitos, que, no entanto, não são válidos à escala atômica.

Por exemplo, não podemos introduzir a posição definida de um electrão numa equação da mecânica matricial.<sup>34</sup> Para realizarmos a equação fazemos uma medida da posição do electrão e acrescentamo-lhe, pelo menos, a incerteza mínima dada pela fórmula de Heisenberg. Ficamos assim com um conjunto de posições possíveis para o electrão. A partir deste conjunto de posições é que se pode determinar uma onda de probabilidades que nos vai indicar o comportamento do electrão numa determinada experiência.<sup>35</sup>

---

<sup>33</sup> Pode-se encontrar esta posição em *Physics and Philosophy*, p.46 que marca o início da explicação da interpretação de Copenhaga:

"A interpretação de Copenhaga da teoria quântica começa com um paradoxo. Qualquer experiência em física, quer se refira a fenómenos do dia-a-dia quer a fenómenos atômicos, deve ser descrita nos termos da física clássica. Os conceitos da física clássica formam a linguagem pela qual nós descrevemos as experiências e assinalamos os resultados. Não podemos nem devemos substituir estes conceitos por outros. Mas ainda assim, a aplicação destes conceitos está limitada pelas relações de incerteza. Enquanto usamos os conceitos clássicos temos de ter em mente o limitado domínio em que são aplicáveis, mas não devemos nem podemos tentar melhorá-los."

<sup>34</sup> A impossibilidade de se escrever em mecânica quântica a posição exacta de um electrão é explicada por Heisenberg, ao explicar a introdução do princípio da incerteza:

"Apesar de tudo, nenhum dos dois lograva compreender como é que um fenómeno tão simples como a trajectória de um electrão através da câmara de nevoeiro podia harmonizar-se com o formalismo matemático da mecânica quântica ou da mecânica ondulatória. Na mecânica quântica não aparecia de modo algum o conceito de trajectória, e na mecânica ondulatória, ao falar-se de um raio material, era necessário supor âmbitos espaciais muito superiores ao diâmetro de um electrão. A situação experimental oferecia, sem dúvida, um cariz muito diferente. (...) Concentrei então os meus esforços totalmente na questão de como na mecânica quântica se pode representar matematicamente a trajectória de um electrão na câmara de nevoeiro. Quando, numa das primeiras tardes, tropecei, na minha análise, em problemas insuperáveis, compreendi com clareza que nos devíamos ter equivocado no modo de pôr a questão.(...) Sempre tínhamos referido com certa superficialidade que trajectória do electrão era observável na câmara de nevoeiro. Porém, talvez o que vissemos ficasse muito aquém disso. A verdadeira questão a formular devia ser então: pode-se representar, dentro da mecânica quântica, uma situação na qual aproximadamente – quer dizer, com certa imprecisão – se encontre um electrão num dado lugar, e também aproximadamente (...) possua uma dada velocidade, tudo isto de tal maneira que as imprecisões se possam reduzir ao ponto de se eliminarem as dificuldades da experiência? Um breve cálculo, depois de regressar ao Instituto, confirmou-me que se podiam representar matematicamente tais situações".

<sup>35</sup> Cf. *Quanta, Grãos e Campos*, p.127.



Se, no entanto, soubéssemos com exactidão total a posição do electrão e a introduzíssemos na fórmula o comportamento do electrão seria determinado sem qualquer grau de incerteza.<sup>36</sup> Ou seja, as previsões da mecânica quântica deixariam de ter um carácter estatístico mas, em contrapartida, veríamos sempre o electrão como uma partícula bem determinada no espaço, porque, para cada momento poderíamos determinar com toda a precisão a posição do electrão. Ora este electrão, precisamente por ter sempre uma posição bem determinada, nunca poderia manifestar o efeito de interferência.

No entanto os electrões manifestam-se, nas suas trajectórias, como ondas. Isto é previsto pela mecânica quântica e pode até ser calculado o resultado final da interferência entre várias ondas. Gostaria de voltar a frisar que estas ondas só são obtidas se tivermos em conta a incerteza básica na posição do electrão e portanto, o electrão não parece ter uma posição bem definida no espaço.

No entanto poderíamos medir com muita precisão a posição do electrão se não quiséssemos saber nada da sua velocidade. Portanto parece que essa posição de facto existe, ou não?

Imaginemos uma onda luminosa que se espalha sobre uma certa região, por exemplo,  $1 \text{ cm}^2$  de uma chapa fotográfica com a mesma superfície da onda. Essa onda tem uma energia definida, como já vimos, por  $nh\nu$ . Vamos supor que esta onda tem uma energia de  $h\nu$ , sabemos assim que só um quantum de luz irá atingir a chapa fotográfica. Não temos, até agora, nenhum processo de determinar em que ponto exacto é que o fóton irá cair. Sabemos apenas que ele tem maior probabilidade de cair no centro da onda de probabilidade do que na orla. Essas probabilidades podem ser calculadas e, se verificarmos o resultado das previsões constatamos que, em média, os electrões caem na chapa à taxa prevista.

Mas, se o electrão está disperso por toda onda (senão não poderíamos explicar o processo de interferência nem, no âmbito da interpretação de Copenhaga, justificar o princípio da incerteza), como é que vemos apenas um pequeno ponto e não uma mancha correspondente à amplitude da onda?

Segundo a interpretação de Copenhaga, ocorre o que é costume referir-se por *redução do pacote de ondas*. A redução do pacote de ondas é aquilo que acontece quando um electrão-onda se transforma num electrão-corpúsculo. Segundo a interpretação de Copenhaga isto acontece da seguinte forma: Há uma onda espalhada por um espaço (tão grande quanto quisermos) de repente a onda encontra um obstáculo, mas como as ondas nunca se dão a conhecer aos instrumentos de observação, transforma-se. Em quê??.... Num corpúsculo!!! Ou, como diz Heisenberg, há “uma transição do ‘possível’ para o ‘actual’ ”.<sup>37</sup>

Por outras palavras a onda, é, com já tínhamos visto (segundo a interpretação de Born) o que nos indica a probabilidade de encontrarmos um electrão num certo sítio, ela exprime uma

---

<sup>36</sup> A física quântica não consegue fazer previsões que não sejam de carácter estatístico. No entanto, esta situação tem como único responsável o princípio da incerteza. Em mecânica clássica. Esta situação, que é perfeitamente compreensível, era já verificada na física clássica sempre que não podíamos medir com exactidão a velocidade e a posição de um dado objecto.

<sup>37</sup> *Physics and Philosophy*, p.54.

tendência para que um electrão se decida a encontrar num determinado sítio. Não há nenhuma razão (~~ou logos, se preferirem~~) para que o electrão apareça numa posição e não noutra. Tudo o que temos são probabilidades.

Sabemos que se houver 75% de probabilidades de o electrão ir para «A» e 25% de probabilidades de ir para «B», quando tivermos enviado mil electrões, cerca de 750 estarão em «A» e 250 em «B» mas não há, nem poderá haver nunca, nenhuma forma de dizer o que acontecerá a um electrão individual, pois, aquilo que o «determina» são unicamente probabilidades, e as probabilidades só se tornam previsíveis quando aplicadas a grandes números, não têm qualquer sentido quando aplicadas a poucos elementos.

## 1 – ***Dificuldades da interpretação de Copenhaga***

### II — 1 – .1 ***A redução do “pacote de ondas”***

~~Bem, se o leitor acha isto estranho fique sabendo que não está só. Mas o mais estranho ainda está para vir.~~ Poderíamos agora querer saber o que é que faz com que um electrão passe de possível a actual. A resposta parece simples. É quando há uma interacção com a matéria. O problema é que a matéria não é algo de estático que está ali para receber os electrões. Pelo contrário a matéria é constituída por electrões, prótons, neutrões, mesões, fotões, e uma infinidade de partículas, todas elas obedecendo às estranhas regras do mundo quântico.

Bohr e Heisenberg defendiam a posição que a transição se dava quando ocorria uma amplificação irreversível. Ou seja, quando a onda, ao chocar com uma placa fotográfica, provoca efeitos ‘irreversíveis’ sobre um determinado electrão e concentra nele toda a sua energia. Ou seja, há uma contracção instantânea de toda a onda num único ponto.

Isto levanta dois tipos de problemas. O primeiro é que, segundo a relatividade restrita, nada se pode mover a uma velocidade maior que a da luz, consequentemente acções à distância não podem ser instantâneas. Ora a redução da função de onda implica que essa redução seja instantânea (e podemos imaginar ondas bastante grandes).

Outro problema reside na própria redução da função de onda. À pouco dizíamos que uma redução de onda ocorria quando a onda interactuava com a matéria. Ora isto não é bem assim. Se duas ondas interactuarem não se transformam em dois corpúsculos, pelo contrário, comportam-se como boas ondas e interferem entre si. O instrumento de medição também é um poço de tendências e potencialidades por concretizar. Se o descrevêssemos como parte da experiência poderíamos fazer também para ele uma função de probabilidade que nos daria os vários resultados possíveis em que ele se poderia encontrar.

Ora, segundo a interpretação de Copenhaga, todos estes estados coexistiriam até que uma observação fosse feita sobre o instrumento de medição.<sup>38</sup> Mas então o instrumento de observação

---

<sup>38</sup> Tudo o que tem sido dito até aqui pode ser encontrado em praticamente todos os livros que tratam sobre a filosofia da física quântica. Dos livros apresentados na Bibliografia, o que apresenta uma análise mais completa e interessante sobre os paradoxos do colapso das funções de ondas é o livro *Quanta, Grãos e Campos*, pp.126-134.

que observava o instrumento de observação teria também de ser observado para se transformar de potencialidade a actualidade, etc.

## II — 1 – .2 ***Consequências da redução do pacote de ondas como resultado de uma observação***

Há curiosidades interessantes ligadas a este problema. O matemático Von Neumann acabou por dizer que só a consciência podia explicar a redução da função de onda. E isto não é uma posição isolada.

(É claro que há outros meios de resolver a situação, por exemplo, estabelece-se a existência de múltiplos mundos e em cada mundo acontecem uma de todas as possibilidades possíveis. Por exemplo, quando enviamos um fóton em direcção a um alvo longínquo há imensos sítios que ele pode atingir dentro do alvo. Se quiséssemos dividir o alvo em mil partes por ex., no momento em que o fóton atingisse o alvo o mundo desdobrar-se-ia em mil mundos e em cada um desses mundos o electrão tinha atingido uma parte diferente do alvo. Curioso, não?)

Os problemas que esta interpretação coloca são tão variados quanto se quiser. Por exemplo, o universo nem sempre foi dotado de seres com consciência, pode ser que sejamos nós que, há medida que vamos descobrindo coisas no universo vamos construindo a realidade passada do universo.

Há outros problemas que se poderiam pôr. E é fácil imaginar outros. Estes problemas, no entanto, não são só aspectos engraçados da interpretação de Copenhaga. Estas posições resultam de estudos aprofundados sobre a congruência e possíveis alternativas à posição de Copenhaga. Além disso, desde que foi criada, esta interpretação só tem sido fortalecida pela experiência.

## 2 – ***A Experiência de EPR.***

Um exemplo desse fortalecimento é a experiência mental proposta por Einstein, Podolski e Rosen, também chamado como paradoxo de EPR.<sup>39</sup> A experiência procurava mostrar que ou a interpretação de Copenhaga era incompleta ou teria de se admitir acções instantâneas à distância. Segundo a interpretação de Copenhaga não podemos conhecer simultaneamente a posição e a velocidade exactas de uma partícula (o que violaria o princípio de incerteza e deitaria por terra toda a interpretação de Copenhaga).

A experiência consistia na produção de um par de partículas feita por um método tal que ambas as partículas fossem produzidas ao mesmo tempo e com a mesma velocidade (ou outras características, como o spin), de tal forma que, conhecendo a posição e velocidade de uma conheceríamos também a posição e a velocidade da outra.

Imaginemos um par de partículas «A» e «B» produzidas deste modo. A partícula «A» segue uma direcção e a partícula «B» segue a direcção oposta. Deixamos passar algum tempo, até que as partículas se afastem o suficiente, e depois medimos a velocidade de «A» com o máximo de rigor que pudermos. É claro que teremos poucas indicações em relação à posição ocupada por «A», mas

---

<sup>39</sup> A experiência de EPR foi publicada na revista *Physical Review*, vol.47, 1935.

poderemos saber com bastante rigor a sua velocidade sem alterarmos muito o estado da partícula. Em seguida medimos a posição da partícula «A», é claro que isso irá alterar de forma imprevisível a sua posição e velocidade, mas não irá, em princípio, alterar a posição e velocidade da outra partícula. Ora sabendo a velocidade da partícula «A» podemos deduzir a velocidade da partícula «B». Medindo depois a posição exacta da partícula «A» podemos também saber com a mesma exactidão a posição da partícula «B».

Provava-se assim que poderíamos conhecer, com exactidão superior à da estipulada pelas relações de incerteza de Heisenberg, a velocidade e a posição da partícula «B». E isto provaria que a mecânica quântica estava incompleta pois, ao contrário do que afirmava, embora não possamos conhecer a velocidade e a posição de uma partícula a verdade é que elas existem.

Mas no artigo que escreveram os três físicos não disseram que a interpretação estava errada. Havia outra opção: a medição sobre a partícula «A» podia modificar o estado da partícula «B» de forma instantânea. Preservava-se assim a incerteza sobre a posição e a velocidade da partícula «B» mas, em contrapartida, teriam de ser admitidas acções instantâneas à distância entre qualquer par de partículas. Como esta era uma alternativa pouco aceitável deduziu-se que a interpretação de Copenhaga estaria incompleta.

A posição de EPR parte, no entanto, de um pressuposto essencial que a interpretação de Copenhaga nunca admitiu como verdadeiro: a existência de um realidade objectiva, isto é, independentemente do observador.

Segundo a interpretação de Copenhaga aquilo que acontece deve restringir-se à observação. E aquilo que observamos depende da maneira como o observamos (por exemplo tanto podemos observar uma onda como um corpúsculo). Portanto não faz sentido falar de uma partícula com uma velocidade e uma posição bem definida se ainda não a observámos.

## II — 2 — .1 ***O teorema de Bell.***

Um pouco mais tarde John Bell conseguiu imaginar uma forma de pôr à prova a experiência de EPR.<sup>40</sup> Consistia em emitir pares de partículas em direcções opostas mas com certos valores relacionados (por exemplo o spin ou a polarização). Segundo os pressupostos de EPR, em que há uma realidade objectiva e uma causalidade local, não devia haver qualquer interferência entre as medições de partículas afastadas. Ora, em determinadas circunstâncias as leis da mecânica quântica prevêem que haja uma certa interferência entre os resultados de uma observação e de outra, mesmo que as partículas estejam afastadas. Ora o que Bell descobriu é que os resultados diferiam conforme pudesse haver ou não interferência (ou conspiração) entre ambas as medições. Esta diferença é que deu origem ao nome porque é conhecido o teorema de “desigualdade de Bell”.

---

<sup>40</sup> O artigo onde Bell apresentou pela primeira vez o seu teorema foi publicado na revista *Physics and Philosophy*, vol.1, 1964.

## II — 2 – .2 **Consequências da experiência de EPR**

Ora, se a desigualdade de Bell for confirmada quer dizer que temos de abandonar um dos princípios sobre que se apoiava a interpretação de EPR. Ou abandonamos a noção de realidade objectiva e o real depende da forma como observamos e do facto de observarmos a realidade. Ou então asseguramos uma realidade objectiva mas temos de supor que a nossa medição da partícula faz com que o estado da outra se modifique.

Recentemente foi realizada uma experiência em que foi provada que esta interferência entre as observações, que modifica o estado de uma partícula em função da observação exercida sobre a outra, transporta esse efeito a uma velocidade superior à da luz.

Encontramo-nos agora no cerne do estranho mundo quântico já analisámos alguns aspectos da interpretação de Copenhaga. Vimos como os nossos conceitos são inaplicáveis ao que se passa entre as experiências e como, tendo de explicar a dualidade onda-corpúsculo, se chega à conclusão que tem de se dar uma redução instantânea do pacote de ondas que se converte numa partícula, e qual o papel que a consciência terá de ter nesse processo.

Vimos também que já não podemos acreditar num mundo perfeitamente objectivo, isto é, independente do observador, e, simultaneamente, sem acções instantâneas à distância (partículas que conspiram de forma a não nos deixarem ter uma ideia precisa do que lhes acontece). As várias interpretações que se fazem podem-se dividir em dois grupos: os defensores da interpretação de Copenhaga e os que acham que ela é insuficiente porque não nos dá uma imagem do que se passa na realidade.

## III — **Defensores e opositores da interpretação de Copenhaga.**

Os defensores da interpretação de Copenhaga vêm-na como o culminar de uma série de raciocínios surgidos em função de necessidades de explicação de experiências. Assim, devemos estar prontos para uma revolução do nosso modo de pensar e perceber que as nossas crenças e objectivos que procuravam uma visão perfeitamente determinista do mundo são infundadas, e só possíveis porque o âmbito das experiências a que o homem teve acesso só há pouco tempo se estendeu para fora dos domínios tradicionais em que o homem nasceu e aprendeu a pensar. A mecânica quântica mostra-nos assim a verdadeira face do mundo, uma face incompreensível e imprevisível a não ser estatisticamente.

Há também quem, ainda defensores das cores de Bohr e Heisenberg, defenda que não faz sentido falar de medições particulares. Como todos os problemas surgem porque não se consegue perceber o que faz com que um dado acontecimento individual tenha um determinado comportamento esta posição evita todas as incongruências embora evite também todos os problemas sem dar resposta a nenhum deles.

Outra posição, ainda dentro do âmbito dos que defendem a validade da mecânica quântica (mas não da interpretação de Copenhaga), é a de que são as nossas regras lógicas que estão erradas. Por exemplo pensamos que uma partícula só pode ser um corpúsculo ou uma onda. É esta maneira de ver as coisas que nos leva aos paradoxos que leva. Deveríamos substituir a nossa lógica por uma lógica não booleana. Esta perspectiva é interessante. Seria também interessante descobrirmos a quantidade de coisas que deixaria de ter sentido ao aplicarmos esta nova lógica (ou, talvez, a quantidade de coisas estapafúrdias que passariam a ter sentido).

Depois, explorando o papel da consciência no acto da observação, aos que procuram retirar daí o domínio da mente sobre a matéria. Assim, no decorrer de uma observação só a mente pode determinar qual dos acontecimentos possibilitados pela onda de probabilidade (a onda  $\psi$  de que já falámos) irá ter lugar. Nesta perspectiva, por exemplo, temos que: “o aparecimento de um novo  $\psi$  do sistema durante a medida [isto é, o aparecimento de uma nova onda de probabilidade causada pela observação que provoca a passagem do possível ao actual], não resulta de uma qualquer interacção misteriosa entre o objecto e o aparelho de medida. Deve-se apenas à consciência de um eu que se separa da antiga função  $\psi$  e constitui uma nova objectividade em virtude da antiga função  $\psi$  e constitui uma nova objectividade em virtude da sua observação consciente, atribuindo agora ao objecto uma nova função de onda”.<sup>41</sup>

Bem, podemos agora ficar descansados por não haver já “qualquer interacção misteriosa entre o objecto e o aparelho de medida”!

Por outro lado, nesta interpretação, a indeterminação que podemos verificar ao nível quântico pode servir também de explicação para a existência de um livre arbítrio que seria uma espécie de escolha entre vários estados possíveis em potencialidade.

Outra posição (há muitíssimas) é uma a que já aludimos atrás. Existem muitos universos paralelos, sempre que algo pode acontecer de uma forma, acontecerá, mesmo que essa forma seja mais do que uma. Assim, quando um fóton encontra uma lente polarizada e tem 50% de hipótese de passar haverá um universo no qual ele passa para o outro lado e outro universo no qual ele é deflectido. Esta interpretação tem a vantagem de explicar, ou poder vir a explicar, a existência de probabilidades e, se estiver correcta, talvez se torne então possível fazer medições individuais (não é algo de que os físicos que defendem esta tese falem de momento).

Finalmente temos uma última abordagem que se revolta contra a física quântica, ou, pelo menos, contra a sua interpretação actual. Esta interpretação, dizem, não é completa, porque, na verdade, não descreve o que se passa entre as diversas experiências dizendo mesmo que tal não é possível. Ora, não se devia partir de um tal pressuposto (partilhado pelos apoiantes da

---

<sup>41</sup> *Quanta, Grãos e Campos*, p.134.

interpretação de Copenhaga); antes pelo contrário, dever-se-ia tentar uma abordagem mais profunda que tentasse descrever o que se passa ao nível atómico.

Esta, pode-se dizer, é a perspectiva clássica. Podemos encarar esta denominação como negativa ou positiva. Até agora a história ainda não deu uma prova concreta de quem é que tem razão. Podemos dizer que, até agora, não houve qualquer hipótese bem sucedida para descrever o que acontece ao nível atómico. Isto parece ser um ponto a favor da interpretação de Copenhaga. Por outro lado não há uma prova concreta de que não seremos capazes de vir ainda a descobrir um conjunto de entidades que expliquem o que acontece em cada caso particular. Ora essa prova por certo que não surgirá se estivermos todos a pensar que é impossível atingi-la. E este é o principal argumento dos que criticam a interpretação de Copenhaga.

Assim podemos ver a interpretação de Copenhaga não só como uma nova dimensão do pensamento humano mas também a podemos encarar como um mal que nos irá tirar séculos de evolução ao desviar a nossa atenção da tentativa de explicação de uma realidade objectiva.

Alguns dentre estes defensores trabalham na confecção de novas físicas que envolvem coisas como variáveis escondidas ou potencial quântico. Não vou aqui abordar profundamente esta teoria, embora fosse talvez aquela que mais valesse a pena aprofundar. Sucintamente pode-se dizer que ela tenta sobretudo preservar a realidade objectiva do mundo e descrevê-lo em termos mais ou menos deterministas. O preço a pagar, é claro, é a causalidade não local. Isto é, tem de se supor que existe uma forma de certos fenómenos afectarem outros a uma velocidade instantânea, mesmo que estejam muito distantes um do outro, por outro lado, um electrão ou um fóton deverá conter em si informação sobre o mundo que o rodeia, por exemplo se vai ser submetido a uma experiência de duas fendas, distância entre os buracos, etc. Embora seja uma maneira de manter a objectividade do mundo podemos sem dúvida concluir que esse mundo não é um mundo muito habitual.

Enfim, em jeito de conclusão poder-se-á dizer que, no mundo da física, nada será o mesmo depois da entrada da física quântica em cena. Seja qual for o caminho seguido o que é certo é que muitas dos conceitos básicos que guiavam os homens no seu conhecimento da realidade estão a cair.

É de certa forma estranho o pouco impacte que estas estranhas descobertas têm sobre as grandes massas e sobretudo sobre o meio filosófico, já que, de certo modo, vem ao encontro de muitos dos problemas que os filósofos vêm pondo há centenas de anos. Seja como for é de esperar que deste impasse entre várias posições saia um solução que, mesmo que não agrade a todos, terá de ser encarada como um ponto de partida se o homem quiser continuar a evoluir no conhecimento no domínio do universo.

#### IV —

### **3. Conclusão — modelos e mais modelos.**

Há um livro na Biblioteca do Departamento de Filosofia da Faculdade de Letras de Lisboa que procura provar, de forma puramente abstracta, que os átomos terão de ser descobertos. Foi escrito antes de Einstein ter provado que existiam realmente. Mas o que é este realmente? Newton tinha provado que a luz era realmente um corpúsculo mostrando que se movia mais devagar em certos meios, Young mostrou mais tarde que a luz era «realmente» uma onda porque exibia fenómenos de interferência. Mas o que quer dizer este «realmente». Nunca ninguém viu uma onda ou uma partícula de luz e também nunca ninguém viu um átomo. «Mas as experiências confirmam-no», poder-se-ia dizer. Isto é e não é verdade. As experiências o que nos dão são determinados resultados a partir dos quais nós raciocinamos e concluímos sobre o que os provocou. Ora as nossas conclusões dependem de três coisas: da nossa compreensão/interpretação da experiência, dos nossos conceitos e da nossa imaginação. Nenhuma destas partes é desprezível na formulação de uma lei física, ou na descoberta de um novo elemento.

O papel da imaginação pode ser apreciado por exemplo na matemática onde, com base nas mesmas regras se vão sempre descobrindo coisas novas. Podemos ver a importância dos conceitos vendo como eles condicionam a interpretação/compreensão das experiências através do tempo. Um bom exemplo disso é o conceito de peso:

“Assim, estou convencido de que é gratuito qualquer pessoa interrogar-se sobre as causas do movimento para o centro quando o facto de a Terra ocupar o centro do universo, e de todos os pesos para ela se moverem, se torna tão patente nos fenómenos observados.”<sup>42</sup>

Vemos assim como os nossos conceitos nos obrigam a interpretar certas experiências de uma forma e não de outra. Mas como saber se os nossos conceitos são apropriados em relação às verdadeiras características da natureza? A esta resposta ainda ninguém conseguiu responder. Descobrimos no entanto, com algum espanto, que a forma dos nossos raciocínios está sempre de acordo com a natureza. A lógica, neste domínio, parece imbatível. Por exemplo descobrimos novas propriedades nos números, que por vezes nos obrigam a reformular antigos conceitos matemáticos. No entanto a lógica das relações que se estabelecem entre eles é sempre a mesma. O problema é que fomos nós que atribuímos a lógica que os números deviam seguir. Depois foi só ver as consequências. O mundo, no entanto, tem uma lógica própria que podemos ter, ou não, capacidade para descobrir.

Parece-me que ainda é cedo para atribuir à interpretação de Copenhaga um valor positivo ou negativo. Pode ser que ela seja o primeiro passo de uma revolução que se anuncia e que irá modificar substancialmente muitos dos padrões que temos sempre seguido desde o tempo dos

---

<sup>42</sup> Ptolomeu, *Almagest*, citado em *Deus Joga aos Dados?*, p.47.



gregos. No entanto, não se pode saber a priori se o universo tem ou não um  $\lambda\omicron\gamma\omicron\varsigma$  inteligível na perspectiva humana. É preciso tentar descobri-lo. O que me parece errado na Interpretação de Copenhaga foi a «apressada» declaração de inutilidade dos nossos conceitos quando atribuídos ao mundo atômico. Talvez fosse melhor ter mais esperança na imaginação humana.

Gostaria de concluir com uma frase que também encerra o livro *Deus Joga aos Dados*, de Ian Stewart:

“Se Deus jogasse aos dados... ganhava”

## V — Bibliografia

GRIBBIN, John, *À Procura do Gato de Schrödinger*, Trad. Mário Berberem Santos, Editorial Presença, Lisboa, 2ª edição, 1988.

DAVIES, Paul & BROWN, J.R., *O Átomo Assombrado*, Gradiva, Trad. José Luis Malaquias Lima, Lisboa, 1991.

PAGELS, Heiz, *O Código Cósmico*, Gradiva, Trad. Jorge C. Buesco, 2ª edição, Lisboa 1982, pp. 5-226.

SILVA, J. L. Andrade & LOCHAK, G., *Quanta, Grãos e Campos*, Trad. Manuel Pina, 1969.

HEISENBERG Werner, *Physics and Philosophy*, Harper & Row, 1959.

HEISENBERG Werner, *La Nature dans la physique contemporaine*, Trad. Ugné Karvelis & A. E. Leroy, Gallimard, 1962, pp. 1-55

HEISENBERG Werner, *Diálogos Sobre Física Atômica*, Trad. José Cardoso Ferreira, Editorial Verbo, Lisboa/São Paulo, 1971.

EISBERG, Robert & RESNICK, Robert, *Física Quântica*, Editora Campus, Rio de Janeiro, 1979.

FEYNMAN, Richard, *QED*, Trad. , Gradiva, Lisboa,

FEYNMAN, Richard, LEIGHTON, Robert & SANDS, Matthew, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1981, Vol. III, 1º Cap. 1ª parte.