

Física Quântica
Entenda as diversas interpretações da física quântica
por Osvaldo Pessoa Jr.



http://www2.uol.com.br/vyaestelar/fisicaquantica_artigos.htm



Osvaldo Pessoa Jr. - Física Quântica

É filósofo da ciência, professor no Depto. de Filosofia da USP, fez doutorado na Indiana University (1990) sobre filosofia da física quântica. É autor do livro "Conceitos de Física Quântica" (Livraria da Física, 2003).

Textos 1 a 64
(2007-11)

Sumário

1. As interpretações idealistas da física quântica são viáveis?	1
2. Partículas e o povo de Tlön	2
3. O Conceito de Onda	4
4. A Primeira Lição de Física Quântica	6
5. O Problemático Colapso da Onda	7
6. Onde está o Átomo de Prata?	9
7. O Problema da Medição	12
8. A Consciência Legisladora	14
9. Onde está o Gato de Schrödinger?	16
10. O Yin-Yang da Complementaridade	17
11. O Dilema do Místico	20
12. O Princípio de Incerteza	21
13. A Escolha Demorada	23
14. O que é a Ciência Ortodoxa?	26
15. A Consciência é um Fenômeno Quântico?	29
16. Interpretando o Experimento da Fenda Dupla	31
17. O Primeiro Debate Einstein-Bohr	32
18. Teorema de Bell para Crianças	36
19. Naturologia, Teoria Quântica e o Efeito Placebo	38
20. Observando Trajetórias	40
21. A Fronteira entre o Quântico e o Clássico	42
22. As Interpretações dos Muitos Mundos	44
23. A Interpretação da Onda Piloto	47
24. Individualidade de Partículas Quânticas	51
25. É Possível Ver um Átomo?	53
26. Astrobigoaldo quer Informação Instantânea	57
27. Computação Quântica	59
28. O Efeito Zenão Quântico	61
29. O Paradoxo de EPR	63
30. Retrodição é Especulação?	66
31. A Interpretação Transacional	68
32. Quatro Aspectos Essenciais da Física Quântica	70
33. O Interessante Engodo da Gnose Científica	72
34. O que aconteceria se viajássemos à Velocidade da Luz?	74
35. Por que há tantas Interpretações da Teoria Quântica?	76
36. A Interpretação da Localização Espontânea	79

37. A Ordem Implicada de David Bohm	81
38. As Origens Hippie do Misticismo Quântico	83
39. O Universo Holográfico	87
40. O Vácuo Quântico	90
41. Pauli, Jung e a Sincronicidade	93
42. Teste Experimental do Teorema de Bell	96
43. Os Estados Coerentes de Glauber	99
44. Budismo e Física Quântica	103
45. Misticismo ou Espiritualidade Quântica?	106
46. Condensados de Bose-Einstein	110
47. Análise de um Argumento Místico Quântico	113
48. Experimento de Resultado Nulo	117
49. Um obstáculo pode aumentar o vazamento?	119
50. Como cutucar uma Bomba sem fazê-la explodir?	121
51. Os Neutrinhos	128
52. A Interpretação das Histórias Consistentes	130
53. Dr. Manhattan e as Superposições Temporais	134
54. Três Tipos de Complementaridade	137
55. A Pirâmide Dupla da Molécula de Amônia	139
56. Fenômenos Intermediários entre Onda e Partícula	143
57. Superposição de Amplitudes na Quântica e na Genética	147
58. Quântons, sedíveis e dragões: leituras realistas da complementaridade	150
59. O Efeito Fotoelétrico (Fotoemissivo)	153
60. Superposições Temporais no Experimento de Franson	157
61. Os Estados dos Elétrons nos Átomos	161
62. O que são Batimentos Quânticos?	166
63. A Nascente Biologia Quântica	170
64. Música Quântica?	173

1. As interpretações idealistas da física quântica são viáveis?

A mecânica quântica é uma teoria científica que descreve muito bem experimentos com objetos microscópicos, como átomos, moléculas, e suas interações com a radiação (por exemplo, a luz). Nos últimos anos, ela tem sido incorporada em visões de mundo místicas, espiritualistas etc., para sustentar idéias como a de que nossa consciência pode se conectar à consciência cósmica.

A extensão da teoria quântica a essas visões de mundo é possível porque a teoria quântica, conforme utilizada na física, apenas faz previsões sobre aquilo que se *observa* ou se mede no laboratório científico. Todos os físicos concordam com o “formalismo mínimo” da mecânica quântica, ou seja, com as regras e leis que fornecem as previsões da teoria sobre as probabilidades de se obterem diferentes resultados de medições. Mas a física quântica não diz nada sobre o que acontece por trás das observações (sobre as causas ocultas dos fenômenos) ou sobre como uma observação é efetuada (ou seja, sobre detalhes do processo de medição, ligando o objeto quântico ao sujeito observador).

Isso faz com que os cientistas e filósofos busquem “interpretar” a mecânica quântica, de maneira a construir uma visão de mundo coerente a respeito da realidade que se encontra por trás das aparências e a respeito do papel do observador. Há dezenas de interpretações propostas na literatura científica (já contei 50, e creio que poderia chegar a uma centena), mas todas têm uma ou outra “esquisitice” (isto é, algum aspecto contra-intuitivo), como veremos à medida que formos caminhando. O fato de sempre haver alguma esquisitice faz com que nenhuma interpretação seja hegemônica.

Dentre essas dezenas de interpretações, algumas podem ser classificadas como *idealistas*. O termo “idealista” pode se referir a alguém que tenha um ideal, mas não é este o significado empregado aqui. Usamos o termo “idealismo” para designar qualquer corrente filosófica em que a mente (a “idéia”) tenha papel essencial na constituição do mundo, da realidade.

Em geral, são as interpretações idealistas da teoria quântica que são incorporadas pelas visões de mundo mais místicas e espiritualistas. No contexto da física quântica, uma interpretação idealista é uma que afirma que a consciência humana tem um papel essencial no desdobramento dos fenômenos quânticos. Na década de 1930, alguns autores, especialmente dois físicos chamados London e Bauer, propuseram que a consciência humana seria responsável pelo *colapso* da onda quântica.

Proponho-me a explicar o que é isso, nos textos que se seguirão a este. Terei que fazer isso com calma, e apresentando figuras. Mas é importante deixar claro que estaremos iniciando nossa exploração com apenas *uma* das interpretações possíveis da teoria quântica: a própria noção de “colapso” não é aceita por todas as interpretações.

Um exemplo de uma interpretação idealista é aquela que é apresentada no filme *Quem Somos Nós?* Quem tem uma visão de mundo mística ou espiritualista pode olhar para a física quântica em busca de novas idéias ou modelos. Mas o filme parece sugerir que a visão idealista é a única maneira de interpretar a teoria quântica. Isso é falso: a mecânica quântica não implica necessariamente o idealismo. A maioria dos cientistas ortodoxos interpreta a mecânica quântica sem tirar as conseqüências idealistas apresentadas no filme. (Discutiremos algumas cenas do filme mais para frente).

Porém, mesmo os cientistas ortodoxos terão que admitir que uma interpretação idealista, que se mantenha consistente com o formalismo mínimo da teoria quântica, é irrefutável, e portanto tem que ser admitida como uma possível explicação do mundo. Este é o campo da *filosofia* que iremos explorar aqui.

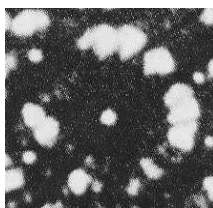
No entanto, o físico Amit Goswami tem dado um passo além, e defendido a correção de experimentos recentes, que indicariam (entre outras coisas) que a consciência humana pode influenciar as probabilidades de ocorrência de resultados de medição. Mas isso vai contra o que diz o formalismo mínimo da teoria quântica. Com esta cartada, Goswami sai do terreno puramente filosófico das interpretações e adentra o terreno científico das afirmações testáveis. A maioria dos cientistas ortodoxos considera que os experimentos mencionados são “pseudociência” (falsa ciência). Dentro de alguns anos, haverá um amplo consenso sobre se tais experimentos são corretos ou não.

2. Partículas e o povo de Tlön

O escritor argentino Jorge Luis Borges tem um conto, “Tlön, Uqbar, Orbis Tertius” (disponível na internet, em espanhol), de seu livro *Ficções*, em que um povo com uma visão-de-mundo “idealista” se surpreende quando um herege afirma que deixou cair uma moeda no jardim, e que dois dias depois encontrou a *mesma* moeda, um pouco enferrujada pelo sereno. Isso seria uma heresia porque, para esse povo, a realidade só existe enquanto representação na *mente* de alguém; assim, como seria possível que as moedas continuassem existindo, mantendo sua identidade, enquanto ninguém pensava nelas?

A noção de que uma coisa continue existindo sem que ninguém esteja olhando não é muito surpreendente para nós. Na verdade, estamos cercados de “coisas” com esse comportamento. O tênis velho que me carrega no asfalto mantém sua identidade ao longo do tempo (ou seja, é o mesmo tênis), mesmo que vá perdendo pedacinhos. Nossa mente representa muito bem esses objetos que mantêm suas propriedades ao longo do tempo, e que mudam pouco. Afinal de contas, nosso cérebro evoluiu em um ambiente com coisas que mantêm sua identidade, então é natural que sejamos bons em representá-las.

Hoje em dia há microscópios que permitem observar átomos. Há uma discussão se isso é de fato uma “observação”, mas de qualquer maneira lá estão as figuras arredondadas ou pontuais que associamos a átomos, figuras essas cuja formação foram *causadas* pela presença dos átomos:



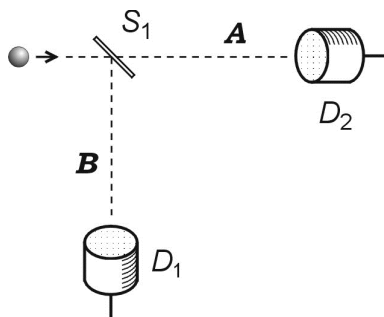
Essa foto foi obtida em 1955 por Müller & Bahadur, e o ponto central é um átomo de níquel.

Gostamos de pensar em um átomo como sendo uma bolinha, e tal representação não é tão despropositada, pois, afinal, quando essas partículas se movimentam livremente (sem campos externos), elas possuem simetria esférica (pelo menos é o que a teoria nos diz). Eis uma representação de uma partícula, que segue uma trajetória contínua, indicada pela seta.



Não há nada mais trivial do que isso! Dei até o nome “Fi” à partícula.

Uma das questões que exploraremos nessa coluna é em que medida essa noção de partícula representa bem os átomos. O povo de Tlön certamente protestaria ante a afirmação de que átomos pudessem propagar em trajetórias contínuas, quando não há ninguém observando. Para eles, podemos apresentar o seguinte experimento, chamado “experimento de anti-correlação”:



A partícula vem chegando toda fagueira pela esquerda, quando um cientista maluco tenta lhe cortar ao meio com uma faca, em S_1 . Ao cortar a partícula em dois, ele espera que metade vá pelo caminho A , e metade por B , caindo nos detectores em D_2 e D_1 . O que ele observa? Se o objeto incidente fosse uma laranja, ele teria sucesso em dividi-la. Mas uma partícula quântica, como um elétron, não pode ser dividida (pelo menos nas energias a que temos acesso nos aceleradores). O elétron chegará inteiro, ou em D_2 ou em D_1 .

Suponha que a partícula seja detectada em D_2 . Não é razoável supor que ela seguiu uma trajetória contínua pelo caminho A ? Claro! Óbvio! Experimento mais simples não encontraremos!

Mas os idealistas de Tlön poderiam argumentar que a partícula poderia ter dado um salto de S_1 a D_2 , deixando de existir no meio do caminho (ou algo assim). Tudo bem, isso seria uma possível maneira de interpretar a situação. Nós, na Terra, estamos acostumados com as chamadas “partículas clássicas”, que seguem *trajetórias contínuas*. Mas há físicos quânticos que já pensaram como os tlönianos, no que podemos chamar de “partículas saltitantes” (como a aparência de uma pessoa dançando sob luz estroboscópica).

O objetivo do texto de hoje foi falar um pouco sobre *partículas*, também chamadas de “corpúsculos”. Elas são fáceis de representar mentalmente: são redondinhas, seguem caminhos bem definidos, e mantêm sua identidade, sem se desmanchar. Duas propriedades podem ser destacadas: elas são *indivisíveis* (até uma certa energia de destruição) e são bem *localizadas* (ou seja, cada uma está num ponto bem definido).

Nada que uma criança já não soubesse... Exceto no mundo de Tlön.

3. O Conceito de Onda

Como escreveu Lulu Santos, “A vida vem em ondas como um mar, num indo e vindo infinito”... Num certo sentido, tudo é onda. Não só as ondas do mar, que conhecemos bem, e não só as ondas sonoras, as ondas eletromagnéticas (luz, raio X, microondas, etc.) e as ondas gravitacionais (que ainda não foram observadas): a matéria também tem um aspecto ondulatório, e portanto *nós somos ondas*, num certo sentido.

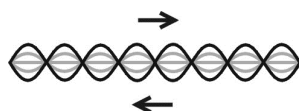
A melhor maneira de entender as ondas é olhando para elas*. Em cima de um rochedo em uma praia de surfista, vemos as ondas vindo de maneira regular, antes de quebrarem na areia. Como um surfista sente as ondas? Suponha que ele esteja atrás da arrebentação, no entardecer, olhando para as primeiras estrelas do céu, deitado em cima de sua prancha. Ele sentirá as ondas através de um movimento de sobe e desce. Isso é curioso: temos a impressão de que uma onda anda para frente, mas os objetos flutuando na água – e as próprias moléculas da água – não andam para frente (a não ser na arrebentação), mas apenas sobem e descem! Pode-se dizer que há transporte horizontal de *energia*, mas não de matéria.

No século XIX, acreditava-se que a luz fosse uma propagação ondulatória em um meio rígido e tênue chamado “éter” (por analogia à água para as ondas do mar, e ao ar para as ondas sonoras). Mas um movimento ondulatório não necessita de um meio que o sustente: imagine uma criança de noite com um ioiô luminoso. Se ela está parada, vemos o ioiô subindo e descendo, em um movimento oscilatório. Mas se ela estiver andando de bicicleta, ao mesmo tempo em que o ioiô oscila na vertical, vemos o ioiô luminoso traçar um percurso parecido com a onda na água, e parecido com o desenho abaixo:



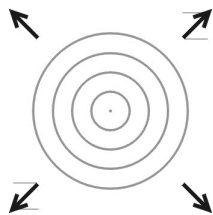
A maneira mais fácil de ver uma onda desse tipo é amarrar uma corda a uma parede, esticá-la com a mão, e começar a mexer a mão rapidamente para cima e para baixo. Pulsos de ondas formarão e percorrerão a corda, de maneira semelhante à figura. Uma formiga sentada na corda ficaria bastante incomodada (será que ela teria consciência deste incômodo, ou ela é só uma maquininha sem sentimentos?): a coitada começara a oscilar para cima e para baixo sem parar.

Só que aí acontece uma coisa curiosa, que salva a formiga: os pulsos de onda que chegam até a parede são *refletidos*, e eles voltam. Ocorre então uma “superposição” de ondas indo e voltando, e o resultado disso é a chamada “onda estacionária”:



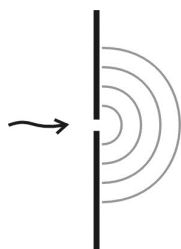
Nesta onda estacionária, há pontos (os chamados “nós”) que não oscilam! A formiga pode ir para estes pontos e descansar. Tem uma onda vindo de um lado e uma onda vindo do outro, mas uma cancela a outra, numa “interferência destrutiva”. Esta é uma característica curiosa das ondas: eu posso *somar* duas ondas e o resultado é zero. Isso nunca acontece com as partículas que vimos no texto anterior.

Imagine agora que você está à beira de um lago bucólico, e que você sobe em um galho de árvore que se debruça por cima da água. Aí você deixa cair uma pedra na água. O que você vê? Você vê ondas circulares se propagando para fora do ponto onde caiu a pedra:

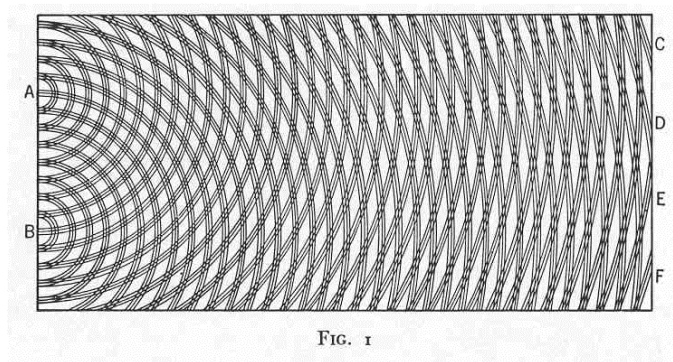


(Cada círculo corresponde a um máximo da onda transversal da figura anterior.) O que esse experimento da pedra mostra é que basta um ponto da superfície da água oscilar para que se formem ondas circulares.

Imagine agora que uma frente de onda no mar encontre uma parede que tem apenas um furo. O que acontecerá? Uma onda pode ser dividida o quanto se queira: assim, uma pequena parte passará pelo furo. O furo é análogo ao ponto onde cai uma pedra, então teremos a formação de ondas circulares após o furo:



O que acontece se houver dois furos no paredão? Teremos a formação de duas ondas circulares. Porém, acontece uma coisa análoga à formação de nós na onda estacionária da corda: há uma *interferência* entre as ondas. Um surfista preguiçoso pode encontrar raias onde a água fica completamente parada! São locais onde uma das ondas sempre cancela a outra onda. O desenho abaixo é tirado de um artigo científico escrito pelo inglês Thomas Young em 1801. As raias marcadas com as letras C, D, E e F são os locais em que o surfista poderia descansar.



O objetivo do texto de hoje foi falar sobre *ondas*, que geralmente transportam *energia*. Ao contrário das partículas, elas são *divisíveis* o quanto se queira, e são *espalhadas* no espaço. Além disso, uma onda pode cancelar outra.

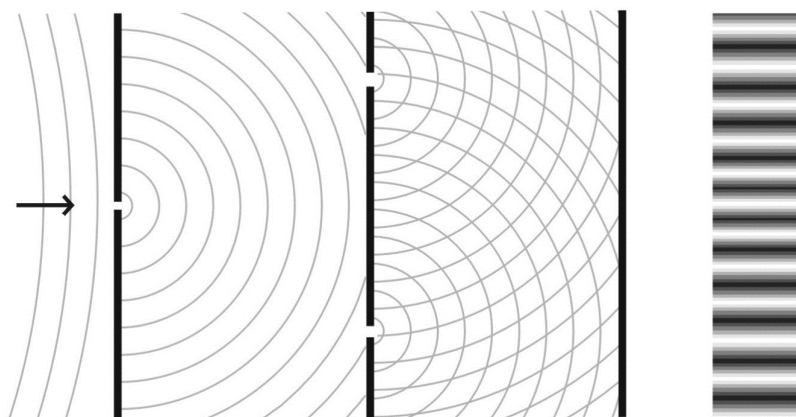
Estamos prontos para começar a adentrar os mistérios da física quântica, no próximo texto. Em poucas palavras, ela é a teoria que, de alguma maneira, concilia aspectos corpusculares (de partículas) com aspectos ondulatórios.

* Há alguns sítios na internet com animações de movimento ondulatório. Por exemplo: <http://members.aol.com/nicholashl/waves/waves.htm> e <http://www.walter-fendt.de/ph11br/>

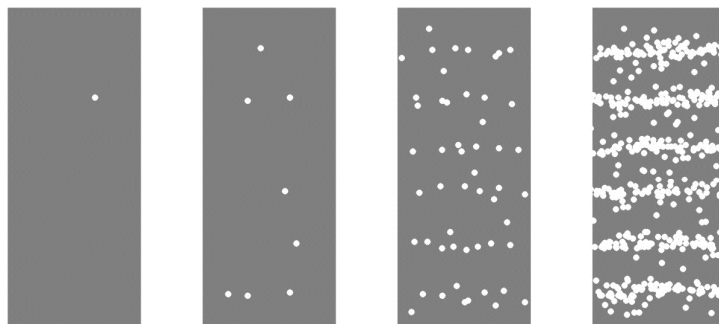
4. A Primeira Lição de Física Quântica

Uma das melhores maneiras de aprender física quântica é partindo das *ondas*, que exploramos no último texto. As ondas no mar, as ondas luminosas, etc., têm alguns aspectos bastante complexos, e tais aspectos estão por trás de boa parte dos mistérios quânticos.

Começamos com o experimento de *interferência* de luz, ilustrado no texto anterior com um desenho feito por Thomas Young, em 1801. O desenho ilustra como se propagam as ondas, mas Young não via diretamente as ondas. O que ele via era uma mancha de luz em uma parede, mancha essa que apresentava um padrão de claros e escuros, que chamaremos “franças” de interferência. Essas franjas estão representadas à direita na figura abaixo (a rigor, o plano das franjas deveria ser girado em 90° para ficar de frente para a luz que vem da esquerda). O que Young fez foi *inferir*, a partir das franjas, que a luz é uma onda, mas ele não via as ondas, da mesma maneira que a gente vê as ondas do mar.



Para transformar este experimento da física clássica em um experimento quântico, duas coisas precisam ser feitas: (1) Diminuir a intensidade da luz para ela ficar muito, mas muito, fraquinha. (2) Usar um aparelho super-sensível para detectar a luz (por exemplo, uma fotomultiplicadora). Feito isso, o que acontece? O que acontece é que a gente mediria as franjas de interferência formando ponto a ponto, como na figura abaixo (da esquerda para a direita).



As franjas de interferência, na verdade, se formam ponto a ponto. No caso da luz, dá-se o nome de “fóton” a cada um desses pontos observados. Nós não discernimos os fótons, mas vemos um padrão contínuo, porque há um número muito grande de fótons em qualquer mancha de luz.

A energia associada a cada fóton é uma quantidade discreta, com um valor bem definido para cada cor de luz, e por isso recebe o nome de “quantum”, de onde vem o nome “física quântica”.

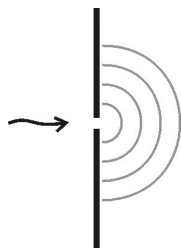
Esta é a primeira lição de física quântica: os objetos microscópicos são sempre observados como pontos (ou seja, têm valores discretos, e não contínuos). Porém, enquanto o objeto está se propagando (sem ser medido), ele o faz como uma onda.

Um mesmo objeto, sem partes, não pode ser uma onda e uma partícula ao mesmo tempo, pois isso seria uma contradição de termos (lembrem-se das definições de partícula e onda apresentadas nos dois textos anteriores). Porém, o que dissemos aqui não é uma contradição, porque o objeto quântico se propaga como onda, e depois, *em outro instante* do tempo, ele é detectado (medido) como uma partícula.

5. O Problemático Colapso da Onda

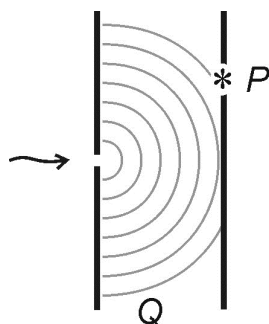
Na primeira lição de física quântica, aprendemos uma maneira de interpretar o que acontece no mundo dos átomos, partículas (como o elétron) e radiação (como a luz). Um objeto quântico se propaga como onda, de maneira que ele não tem uma posição bem definida (está espalhado no espaço), e pode nem ter uma energia bem definida. Mas quando ele é medido, ele é observado com uma posição precisa (o vemos como um ponto).

Voltemos a um exemplo parecido com o do último texto, só que ao invés de termos duas fendas, temos só uma:



O objeto quântico, que pode ser um único elétron, ao passar por uma fenda se espalha, na forma de ondas esféricas. Onde está este elétron? Segundo a interpretação que estamos adotando, ele está espalhado (há outras interpretações, como veremos mais para frente).

Mas se tentarmos *observá-lo*, ele aparecerá espalhado? Vamos fazer o experimento. Colocamos uma tela de cintilação (ou algum detector equivalente) que marca a passagem do elétron. Se o detector tiver uma alta eficiência, mediremos o elétron, e este aparecerá... como um ponto, em *P*! Já sabíamos disso!



Mas notem que depois da detecção do elétron, a onda que estava espalhada desaparece! É costume dizer que a onda sofreu um *colapso*.

Essa idéia de que “uma onda real vai se propagando por aí e, quando é observada (medida), sofre um colapso” nunca foi muito bem aceita entre os físicos, pela seguinte razão. Considere a região em torno do ponto *Q*, na figura. Logo antes da detecção em *P*, havia uma onda em torno de *Q*, mas com a detecção em *P*, a onda em *Q* desaparece instantaneamente. *P* e *Q* podem estar separados a uma distância imensa, como a distância entre a Terra e o Sol: como é que uma medição na Terra (*P*) poderia afetar *instantaneamente* uma onda no Sol (*Q*)?

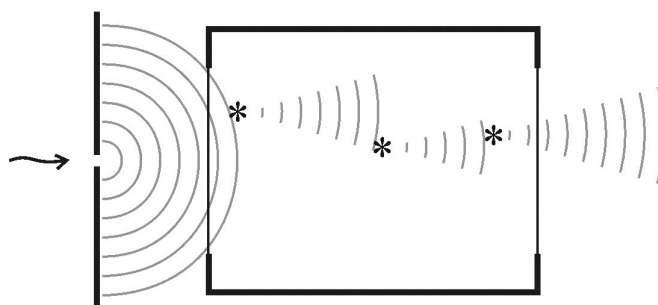
Isso seria um exemplo de “ação à distância”, ou “não-localidade”, e os físicos normalmente odeiam esse tipo de coisa. Eles gostam de “ação por contato” ou “localidade”. Por exemplo, se eu ligo um interruptor de luz, demora alguns microssegundos para uma lâmpada acender. Parece instantâneo mas não é, pois a eletricidade, no fio que leva à lâmpada, tem uma velocidade finita.

Hoje em dia, porém, os físicos quânticos já aceitam falar de não-localidade. Assim, essa interpretação do colapso instantâneo ficou menos problemática do que parecia ser há 30 anos atrás. Na verdade, ela tem outros problemas, mas nós, que estamos aprendendo física

quântica, podemos adotar essa “interpretação realista ondulatória” para entender algumas questões filosóficas que são discutidas nos livros de divulgação desta área que chamarei de “misticismo quântico”.

Uma última pergunta: o que acontece com o elétron depois que ele é detectado? Ao “virar um ponto” ele deixa de ser onda?

Duas coisas podem acontecer com um objeto quântico que é medido: ele pode ser absorvido pelo detector (e desaparecer), como geralmente ocorre com a luz, ou ele pode continuar existindo. Vamos considerar um detector que não destrói o elétron, como faria uma “câmara de nuvem”. A figura abaixo representa o que acontece, segundo a nossa interpretação realista ondulatória:



A câmara de nuvem é um recipiente com vapor d’água, em que se registra a passagem do elétron. O que o cientista vê são apenas os asteriscos, que se alinham mais ou menos em linha reta. Esta é a “trajetória” da partícula elementar, segundo a observação do cientista. Mas a interpretação ondulatória diz que o elétron sempre é onda, e que na detecção (no asterisco) ele se transforma num pulso de onda bem apertado. O que a figura mostra é que, depois da detecção, a onda associada ao elétron começa a se espalhar novamente.

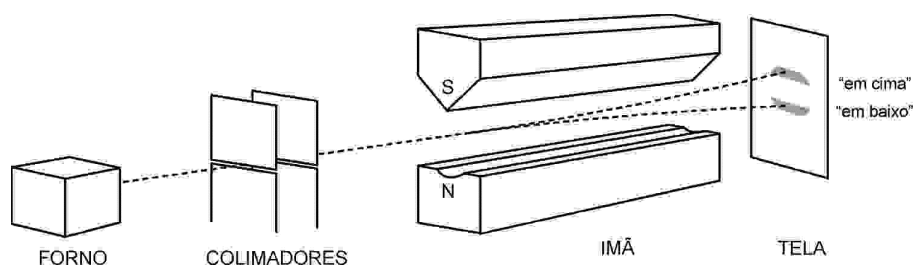
6. Onde está o Átomo de Prata?

No texto anterior, apresentamos o problemático colapso de uma onda espalhada no espaço. O aspecto problemático envolve a não-localidade do colapso, ou seja, algo que acontece na Terra poderia afetar instantaneamente algo que acontece no Sol. Por causa desta estranheza, a maioria dos físicos, especialmente até uns 30 anos atrás, tende a não aceitar que se possa atribuir realidade para as ondas quânticas. Mas, se quisermos interpretar a teoria quântica considerando que tais ondas existem na realidade, poderemos fazê-lo sem cair em contradição com a experiência.

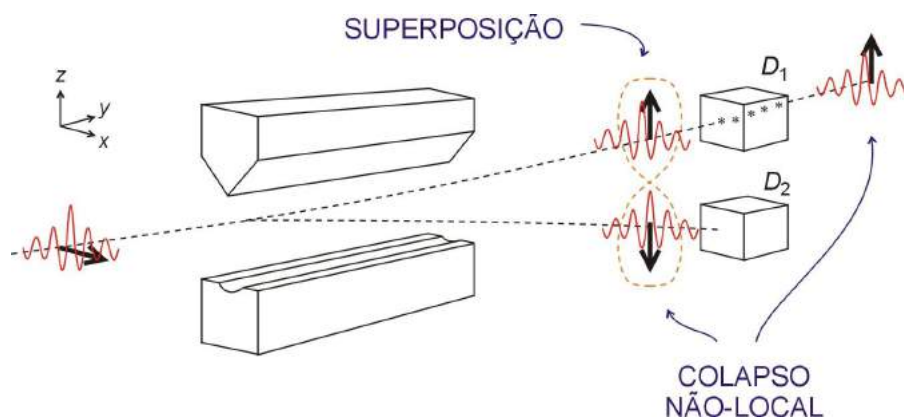
Dito isso, vamos agora explorar um pouco mais essa noção de colapso, para que no próximo texto possamos entender como o observador consciente entra no jogo.

Faremos isso apresentando um novo experimento quântico, conhecido como experimento de Stern-Gerlach, realizado pela primeira vez em Frankfurt, em 1921. Átomos de prata saem voando de um forno, são colimados, e passam dentro de um par de ímãs (S e N), indicado na

figura abaixo. Eles acabam imprimindo duas manchas em uma tela, uma em cima e outra em baixo. Esse comportamento foi considerado tipicamente quântico, pois o que se esperaria, segundo a física clássica, seria uma única e grande mancha ligando a mancha de cima com a de baixo.



Vamos imaginar agora uma modificação no experimento, colocando detectores que não absorvam o átomo, mas os deixem passar. Vamos também concentrar nossa atenção em um único átomo de prata. Na figura abaixo, ele está representado por uma ondinha vermelha com uma seta. Essa seta representa o fato de que um átomo é um ímã em miniatura, ímã esse cujo pólo norte aponta na direção da seta. Para simplificar (usando uma terminologia imprecisa), diremos que esta seta representa o “spin” do átomo.



Note que o átomo tem duas trajetórias diferentes à sua disposição, representadas por linhas tracejadas. No experimento em questão, o átomo foi detectado em D_1 . Segundo nossa interpretação ondulatória realista, no instante da detecção ocorre um *colapso*, e a trajetória que entraria no outro detector (D_2) desaparece. Note também que o spin do átomo muda, após a detecção. De início ele estava “deitado”, apontando na direção $+x$, depois ocorreu a separação pelos ímãs, e após a medição ele tem spin apontado “para cima”, na direção $+z$.

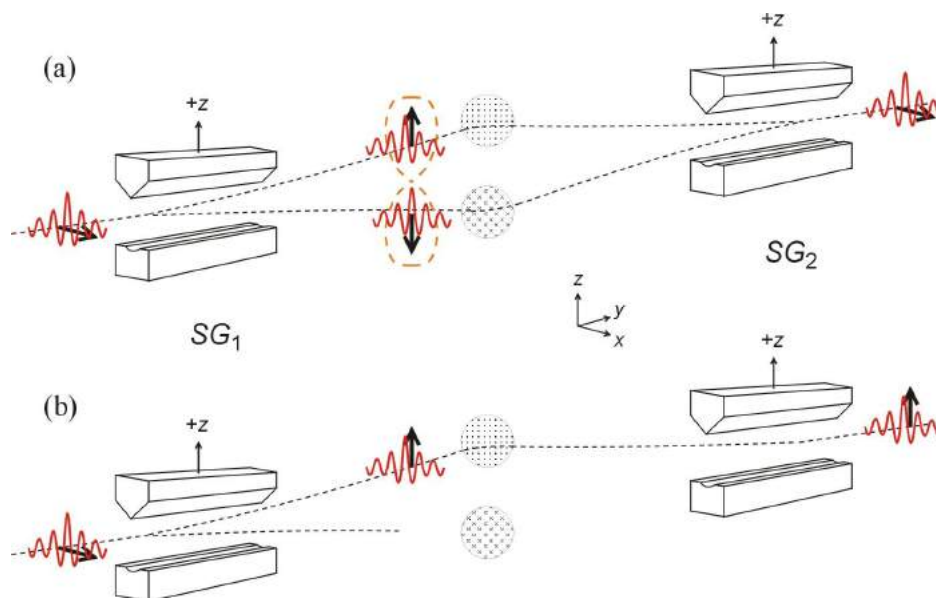
- Onde está o átomo *antes* da detecção?
- O que o formalismo da teoria quântica diz é que “o estado associado ao átomo, antes da medição, está em uma *superposição* de auto-estados de posição”.

- Mas o que significa isso?
- Segundo nossa interpretação, o átomo estaria em *dois* lugares ao mesmo tempo!
- Mas como assim? Quando medimos sempre o observamos em apenas *um* lugar!
- Sim, mas há razões teóricas para considerar que o átomo não está localizado em apenas uma região espacial.
- Razões teóricas? Para dizer que uma *coisa*, que *de fato* está sempre bem localizada, poderia não estar?
- Podemos dizer que ele está *potencialmente* em dois lugares, mas quando o observamos, ele é *atualizado* em uma posição bem definida.
- Ato e potência são conceitos aristotélicos! Precisamos retornar a Aristóteles? Quais são as ditas “razões teóricas”?

A razão pela qual, na presente interpretação, somos obrigados a dizer que o átomo não está localizado nem no caminho que vai para D_1 , nem no caminho que vai para D_2 , mas que ele está de certa forma em ambos ao mesmo tempo, é a seguinte.

Antes de detectar o átomo, podemos *retirar* os detectores, *recombinar* os dois feixes através de outro imã, e o que obteremos no final é *exatamente* o mesmo estado quântico que no início, com o spin apontado na mesma direção $+x$ (ver figura *a*, abaixo).

Porém, se o átomo estivesse em uma posição bem definida, rumando por exemplo para o detector D_1 , e os detectores fossem retirados, na recombinação dos feixes o estado final do spin seria diferente do caso anterior (ver figura *b*), apontando na direção $+z$.



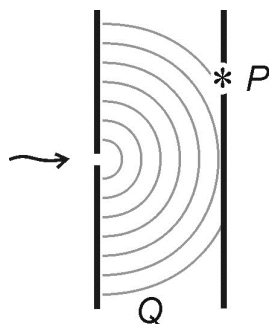
Experimentos foram realizados na década de 1980 com nêutrons, mostrando que de fato a situação (a) é a correta. Ou seja, somos obrigados a admitir que, antes da detecção, o estado correto é de superposição. E o verdadeiro significado disso depende da interpretação adotada.

7. O Problema da Medição

No filme *Quem Somos Nós?*, a cena mais didática com relação à física quântica é a cena das bolas de basquete. A heroína vê uma bola de basquete sendo quicada por um garoto misterioso. Quando ela deixa de *olhar* para a bola, surgem dezenas de cópias da bola em diferentes posições. Depois de alguns segundos, quando ela olha novamente para o garoto, todas as bolas desaparecem, restando apenas uma.

Esta cena é uma alegoria a respeito do que acontece na física quântica. A bola de basquete representa um átomo ou qualquer partícula quântica. O mero ato de olhar ou de observar representa a *medição* feita por um cientista quântico. A transição de muitas bolas para uma única bola representa a “redução” ou colapso do estado quântico. A única falha da cena é que a probabilidade de a bola terminar na mão do garoto deveria ser muito pequena: mais didático seria a heroína, ao final, ver a bola localizada em algum outro ponto, diferente da mão do menino.

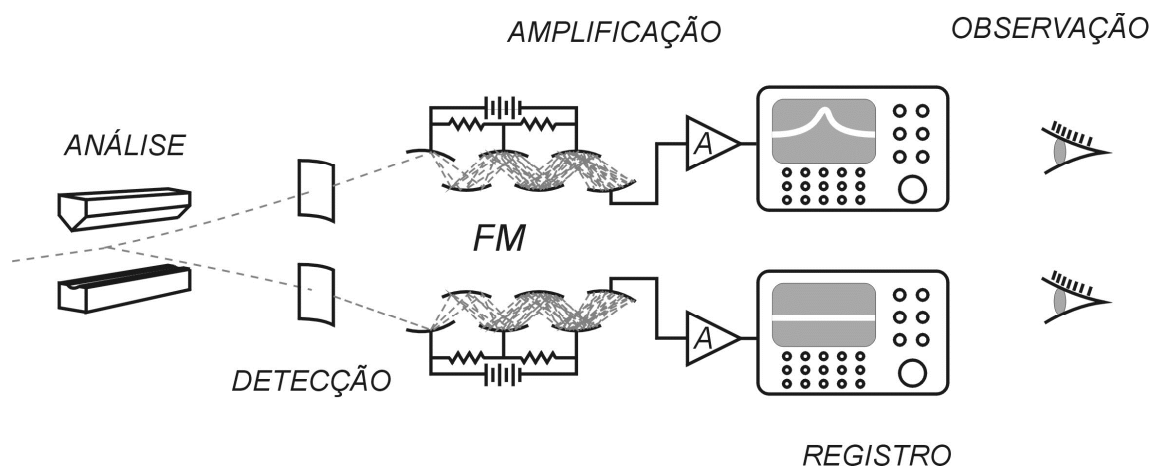
Nessa alegoria, o que faz surgir várias bolas de basquete é análogo a uma certa preparação experimental, como a da figura abaixo, que já tivemos ocasião de analisar (ver texto 5: “O Problemático Colapso da Onda”).



Nesta figura, o objeto quântico sofre “difração” ao passar pela fenda, ou seja, ele se espalha em todas as direções após passar por um buraco bem pequeno. Os semicírculos exprimem a probabilidade de o objeto ser detectado em diferentes pontos, como em *P*. A observação da posição do objeto quântico (o “asterisco” na figura) é análoga à observação final da bola de basquete. Antes da medição, costuma-se dizer que o objeto está numa “superposição” de diferentes posições, ou está *potencialmente* em diferentes posições.

Mas como é que o cientista mede um objeto quântico? Será que ele apenas olha e vê, como fez a heroína surda do filme mencionado?

Na verdade, a medição de um objeto quântico costuma envolver uma intrincada aparelhagem experimental. Entre o objeto e a consciência do cientista, há uma cadeia de diferentes etapas, representada esquematicamente na figura abaixo.



A “análise” refere-se à separação do feixe em diferentes componentes. Na figura, representa-se o experimento de Stern-Gerlach, que vimos no texto 6 (“Onde está o Átomo de Prata?”). O termo “detecção” refere-se ao instante em que o objeto quântico encosta na fina placa metálica do detector, e interage com o “mar de elétrons” presente no metal.

Notem que há duas linhas pontilhadas, cada uma caindo em uma placa detectora. Essas duas linhas representam um *único* átomo, que está superposto nos *dois* caminhos. Cada uma desses componentes interage com elétrons no metal, e isso pode acabar fazendo um elétron sair voando do outro lado da placa. Mas notem que isso acontece nas *duas* placas. Portanto, há agora uma *superposição* de elétron, cada componente rumando por um caminho, mas ambos associados a um único elétron.

A etapa seguinte é extremamente importante: é a amplificação. Nesta etapa ocorre um aumento de energia (fornecida por uma bateria), necessário para que o ser humano possa ver o resultado da medição. O instrumento representado na figura chama-se “fotomultiplicadora” (FM), e era muito usado há meio século atrás. Ele contém uma série de placas: quando um elétron cai em uma placa, três elétrons são ejetados. Esses três são acelerados e caem em outra placa, gerando nove elétrons. Esse processo continua ao longo de doze placas, e no final tem-se um milhão de elétrons!

Será que esses milhões de elétrons continuam em um estado de superposição? Esta é a pergunta crucial para a física moderna, mas ninguém conseguiu realizar um experimento que fornecesse uma resposta. Há, é claro, diferentes teorias a respeito, mas não há nenhuma comprovação experimental!

As visões mais próximas do misticismo quântico, assim como a interpretação dos muitos mundos, supõem que a superposição continua após a amplificação. Há, em seguida, uma outra etapa de amplificação eletrônica (A), e finalmente um registro macroscópico definitivo da informação a respeito do caminho no qual o objeto quântico foi detectado. Tal registro também poderia estar numa superposição, segundo as visões mencionadas.

Finalmente, chega-se à última etapa da cadeia da medição, que é quando o ser humano observa conscientemente os sinais registrados no papel ou em uma tela de computador. Neste instante, com certeza, o cientista observa apenas *um* sinal, e não dois em superposição. E ele então pode anunciar: “ocorreu um colapso da onda quântica”!

Mas uma dúvida permanece...

Se o colapso for algo real, onde e quando ele ocorre? Na detecção? Na amplificação? No registro macroscópico? Ou na observação feita por um ser consciente?

8. A Consciência Legisladora

Em nosso último texto, apresentamos o famoso “problema da medição” da física quântica, que consiste no seguinte. Em primeiro lugar, devemos supor que as entidades microscópicas (átomos, elétrons, luz) existem de maneira real, e que elas tenham uma natureza “espalhada”, como ondas, que existem em todo instante de tempo, mesmo quando não as estamos observando. Essa primeira suposição, conhecida como “realismo ondulatório”, não é aceita por todos os físicos e filósofos quânticos, mas é a partir dela que o problema da medição se formula de maneira clara.

Supondo isso, somos obrigados a reconhecer que as entidades quânticas sofrem “colapsos”, ou seja, a onda associada a elas sofre transições abruptas (por exemplo, antes estavam espalhadas por distâncias de metros, e depois ficam restritas a dimensões de milímetros). Outra maneira de exprimir isso é dizer que uma “superposição quântica” foi “reduzida” a um estado bem localizado.

Esses colapsos ocorrem toda vez que uma medição é efetuada no sistema quântico. A questão é determinar qual etapa do processo de medição é responsável pelo colapso da onda. Seria a detecção (interação com uma placa metálica)? Seria a amplificação (que envolve um aumento de energia advinda de uma fonte externa, como uma bateria)? Seria o registro macroscópico (um número escrito em um papel ou na tela de um computador)? Ou seria a observação feita por um ser consciente?

Todas essas possibilidades são plausíveis, e a questão está longe de estar decidida. Cada uma dessas possibilidades constitui uma “interpretação” da teoria quântica (já mencionamos que há dezenas de interpretações diferentes, o que contribui para a dificuldade que o leigo tem em entender o que está acontecendo!). No entanto, a concepção de que *é o ser humano consciente que seria responsável pelo colapso* sempre chamou atenção de filósofos e místicos, e é esta visão que examinaremos agora.

A idéia de que a consciência humana provocaria o colapso de uma partícula surgiu na década de 1930, em um período em que alguns consideravam eminente o surgimento de uma revolução científica na biologia e na psicologia, assim como tinha acontecido na física. Alguns historiadores da ciência, como Max Jammer, mencionam que foi o matemático húngaro John von Neumann quem lançou a idéia de que a consciência humana causaria o colapso, em torno de 1932, mas ele não publicou nada a respeito. Em 1939, o físico alemão Fritz London e o francês Edmond Bauer popularizaram essa visão em um pequeno livro, lançado em Paris, e intitulado *La Théorie de l’Observation en Mécanique Quantique*, com versão em inglês publicada em 1983.

Logo antes de ocorrer um colapso, London & Bauer consideraram a cadeia que consiste no objeto quântico, no aparelho de medição e no observador consciente, de forma que todos estariam em uma superposição. Em suas palavras:

“O observador tem uma impressão completamente diferente. Para ele é somente o objeto x e o aparelho y que pertencem ao mundo externo, ao que ele chama de ‘objetividade’. Por contraste, ele tem *consigo mesmo* relações de caráter muito especial. Ele possui uma faculdade característica e bastante familiar que chamaremos de ‘faculdade de introspecção’. Ele consegue acompanhar de instante para instante o curso de seu próprio estado. Em virtude deste ‘conhecimento imanente’, ele atribui a si mesmo o direito de criar sua própria objetividade – isto é, cortar a cadeia de correlações estatísticas [...] declarando: ‘Eu estou no estado w_k ’ [...] Assim, não é uma misteriosa interação entre o aparelho e o objeto que produz um novo ψ para o sistema durante a medição [ou seja, o colapso]. É somente a consciência de um ‘eu’ que pode se separar da função prévia $\psi(x,y,z)$ e, em virtude de sua observação, *montar uma nova objetividade* ao atribuir ao objeto de agora em diante uma nova função $\psi(x) = u_k(x)$ ” (London & Bauer, [1939] 1983, pp. 251-2).

O leitor não precisa se preocupar com os símbolos matemáticos e em entender exatamente como London & Bauer explicavam o poder que essa chamada “consciência legisladora” teria sobre o objeto quântico. Independente de sua explicação filosófica, o fato é que eles inauguraram uma “interpretação subjetivista” da mecânica quântica (às vezes chamada de “idealista”), que afirma que nossa consciência teria o poder de provocar um colapso, apesar de nossa consciência *não poder afetar* qual é o *resultado* da medição.

Outro físico importante que defendia explicitamente que a consciência seria essencial na observação, e portanto no colapso, foi Walter Heitler (1949). Ele analisou a possibilidade de se completar uma observação por meio de um aparelho “auto-registrador”, consistindo de duas telas fotográficas paralelas que não absorvem as entidades quânticas. Considerando a passagem de apenas uma partícula carregada, temos certeza (para eficiências de detecção de 100%) que, após serem reveladas, ambas as chapas apresentarão uma marca aproximadamente no mesmo ponto do plano das chapas. Heitler argumentou que o colapso pode ser produzido pela segunda chapa, se esta for revelada primeiro:

“A primeira tela auto-registradora, por si só, não traz certeza para [o resultado de] observações futuras, a não ser que o resultado seja reconhecido por um *ser consciente*. Vemos, portanto, que aqui o *observador* aparece como uma parte *necessária* da estrutura inteira, e em sua plena capacidade enquanto ser consciente. A separação do mundo em uma “realidade externa objetiva” e “nós”, os espectadores auto-conscientes, não pode mais ser mantida. Objeto e sujeito tornaram-se inseparáveis um do outro” (Heitler, 1949, pp. 194-5).

Outros cientistas que defenderam explicitamente posições semelhantes foram o físico James Jeans, o astrônomo Arthur Eddington e o bioquímico John Haldane. O físico Eugene Wigner (1964) resumiria da seguinte maneira esta concepção:

“[...] os físicos concluíram ser impossível fornecer uma descrição satisfatória de fenômenos atômicos sem fazer referência à consciência. Isto [tem a ver com] o processo chamado ‘redução do pacote de onda’ [...]. A consciência evidentemente desempenha um papel indispensável.”

Detive-me, neste texto, em alguns detalhes históricos, para indicar como a interpretação subjetivista da teoria quântica foi defendida por diversos cientistas ortodoxos, apesar de eles constituírem uma pequena minoria na comunidade acadêmica. A partir do final da década de 1980, essas idéias foram incorporadas como ponto de partida do movimento cultural que chamarei de “misticismo quântico”, e que hoje está bastante presente na mídia.

9. Onde está o Gato de Schrödinger?

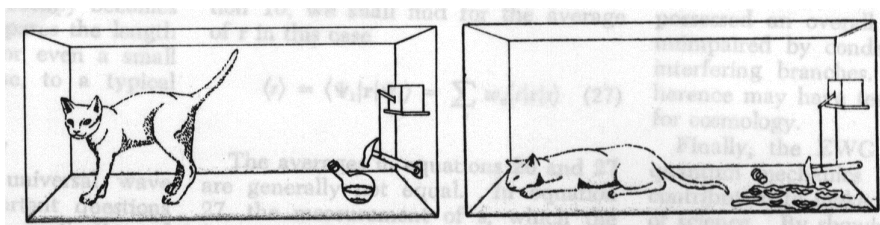
Uma das imagens mais populares, relacionadas à física quântica, é a do “gato de Schrödinger”. O físico austríaco Erwin Schrödinger foi um dos pioneiros da física quântica, e em 1935, no exílio em Oxford, escreveu um artigo a respeito de um famoso argumento de Einstein, Podolsky & Rosen, que futuramente descreveremos.

Neste artigo, Schrödinger examinou alguns problemas conceituais da física quântica, e um deles era a respeito das “superposições quânticas”. Segundo algumas interpretações da teoria quântica (como a realista ondulatória), um átomo pode estar localizado em dois lugares diferentes ao mesmo tempo. É como se ele estivesse dividido simetricamente em dois (antes da observação), apesar de sempre ser *observado* como um só. Exploramos esta questão no texto sobre “O Problema da Medição”.

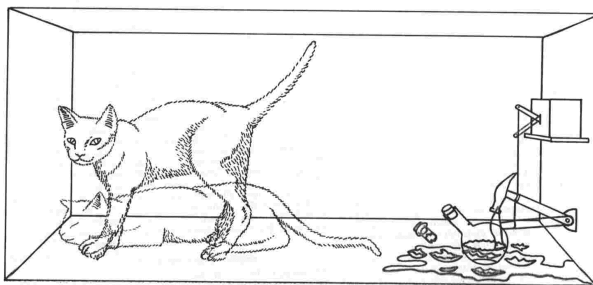
“Ora” – raciocinou Schrödinger –, “talvez possamos considerar que um átomo é uma entidade borrada [*blurred*], que se localiza em dois lugares ao mesmo tempo” (essas não são as palavras exatas que ele usou). “Porém, essa imagem não pode ser estendida para objetos muito maiores do que átomos. Pois se tentarmos colocar um *gato* em uma superposição, fracassaremos, pois um gato está sempre em um estado macroscópico bem definido.”

Schrödinger descreveu como se poderia tentar colocar um gato em uma superposição de dois estados diferentes. Em primeiro lugar, todo o equipamento, incluindo o gato, é colocado em um recipiente completamente isolado do ambiente. Na prática isso é impossível – o que de certa forma invalida o experimento –, mas vamos supor que os efeitos do ambiente sejam desprezíveis.

O físico austríaco imaginou um dispositivo quântico em que um átomo estivesse em uma superposição (por exemplo, em dois lugares diferentes, *A* e *B*), e daí esta superposição seria amplificada. Já vimos um processo semelhante na 2ª figura do texto “O Problema da Medição”. Se o átomo estivesse em *A*, a amplificação levaria um martelo a quebrar um vidro contendo cianureto, e o gato morreria (ver figura abaixo, à direita). Se o átomo estivesse em *B*, a amplificação não afetaria o martelo, e o gato viveria (figura, à esquerda).



Mas o átomo está numa superposição de *A* e *B*; assim, o gato deveria ser levado para uma superposição de estados, *estando ao mesmo tempo vivo e morto* (ver figura abaixo)! Schrödinger considerou que isso seria um absurdo, concluindo assim que não se pode estender a noção de entidades borradas para corpos macroscópicos. Implícito nisso estava a mesma conclusão obtida por Einstein, Podolsky & Rosen: a física quântica seria “incompleta”, ou seja, há algo faltando na teoria quântica.



Outros autores pegaram este exemplo e começaram a tirar conclusões diferentes, e foi assim que o gato ganhou sua fama. A primeira questão central é se é possível, pelo menos em princípio, criar uma superposição de um objeto macroscópico. Esta é uma questão bastante atual, e os físicos já conseguiram criar superposições envolvendo mil partículas (numa molécula de fullereno) separadas por uma distância de 0,1 micra (um micron é um milionésimo de metro). Superposições bem maiores, envolvendo um bilhão de elétrons, foram obtidas não com separação espacial, mas com o sentido de propagação de uma corrente elétrica. Isso tudo parece indicar que certas *superposições macroscópicas* podem ser obtidas em situações de grande isolamento.

Supondo que fosse possível colocar um gato em uma superposição, o que aconteceria se alguém olhasse para ele? Certamente observaríamos ele *ou vivo, ou morto*, mas nunca numa superposição. Isso porque, segundo a física quântica, toda medição (ou observação) leva a um “colapso” do estado. No momento em que o gato fosse iluminado pela luz de uma lanterna, para que pudéssemos vê-lo, ele colapsaria para o estado vivo ou para o estado morto.

Mas será que é possível colocar um gato em uma superposição macroscópica? Provavelmente não, pois ele é um sistema quente, cheio de flutuações que acabariam impedindo a realização da superposição. Se tal experimento fosse possível, seria provavelmente necessário resfriar o gato para uma temperatura próxima do zero absoluto, o que certamente o mataria.

(As figuras foram retiradas de um artigo de B. DeWitt, “Quantum Mechanics and Reality”, *Physics Today* 23, setembro 1970, pp. 30-35.)

10. O Yin-Yang da Complementaridade

Niels Bohr (1885-1962) foi um físico muito importante para o desenvolvimento da física quântica. Em 1913, o jovem dinamarquês conseguiu aplicar as idéias da nascente física quântica (que se iniciou em 1900 com Max Planck) para representar o átomo, que seu orientador Ernest Rutherford, em Manchester, havia mostrado em 1911 ter um núcleo duro cercado de elétrons. O chamado “modelo atômico de Bohr” é ensinado até hoje no Ensino Médio, apesar de ele ter sido superado pela nova mecânica quântica, que surgiria em 1925, com o trabalho do grupo de Göttingen (Heisenberg, Jordan & Born) – a chamada mecânica matricial –, e início de 1926, com a mecânica ondulatória de Schrödinger, que trabalhava em Zurique. Os físicos logo mostraram que essas duas abordagens eram equivalentes, e é o que hoje chamamos de “mecânica quântica”.

Em torno de 1927, Bohr já não estava na linha de frente dos cálculos matemáticos, mas sua maturidade o fez refletir profundamente sobre o significado da nova física dos átomos. Ele estava preocupado com a questão da *interpretação* da teoria quântica. Nos textos desta coluna, já indiquei várias vezes que a teoria quântica pode ser interpretada de diversas maneiras – com efeito, nos últimos textos explorei a “interpretação ondulatória realista”, que fala em colapsos reais da onda quântica, e da subcorrente “subjetivista” que defende que seria a consciência humana que causaria tais colapsos. No entanto, não foi esta a interpretação que imperou na comunidade dos físicos. A interpretação que tornou-se hegemônica a partir de 1928 foi aquela construída em torno das idéias de Bohr, e conhecida como “interpretação da complementaridade” (às vezes chamada também de “interpretação de Copenhague”, ou “ortodoxa” – apesar da ortodoxia às vezes salientar abordagens próximas mas distintas da de Bohr).

Esquiando na Noruega, no início de 1927, Bohr teve a idéia de que as entidades fundamentais do mundo não eram partículas – como os atomistas sempre supuseram – e nem ondas – como Schrödinger supunha. Na verdade, nem faria sentido dizer o que seriam essas entidades fundamentais, pois o nosso conhecimento tem limites (como salientara o filósofo Immanuel Kant no século XVIII). Trabalhamos com *representações* da realidade, e não teríamos acesso às “coisas em si”. Então, a questão que se colocava para Bohr era a de qual é a melhor representação da realidade do mundo microscópico (hoje em dia falaríamos “nanoscópico”): uma baseada em partículas ou uma baseada em ondas?

Uma idéia que Werner Heisenberg considerava nesta época – este jovem alemão estava então trabalhando com Bohr em Copenhague – era de que *tanto faz* usar uma representação corpuscular (ou seja, em termos de partículas) ou ondulatória: ambas forneceriam as mesmas previsões experimentais (explicarei melhor isso quando estudarmos o princípio de incerteza).

A idéia de Bohr era de que o uso de um quadro corpuscular ou ondulatório dependeria do experimento em questão. Dado um experimento, o fenômeno seria *ou* corpuscular, *ou* ondulatório, nunca os dois ao mesmo tempo. Se um fenômeno é representado num quadro ondulatório, ele não poderia ser representado adequadamente em um quadro corpuscular, e vice-versa. E o que faria um experimento enquadrar-se num quadro ou no outro? A resposta era simples: se o experimento exibir franjas de *interferência*, ele é ondulatório (ver figuras no meu texto A Primeira Lição de Física Quântica); se pudermos inferir a *trajetória* do quantum detectado, o fenômeno é corpuscular (ver as duas primeiras figuras do texto Onde está o Átomo de Prata?).

O princípio da *complementaridade* afirma que um fenômeno ou é corpuscular, ou é ondulatório, nunca ambos ao mesmo tempo. Ou seja, se temos interferência, não temos trajetória, e vice-versa. Além disso, Bohr afirmava que essas duas descrições “exaurem” as possibilidades de descrição, ou seja, não haveria uma maneira mais completa de representar uma entidade quântica, como um elétron.

O que é um elétron? Em alguns experimentos, ele se comportaria como partícula, em outros, como onda. Poderíamos dizer que ele é uma entidade mais complexa, um “quanton” (como alguns autores sugerem), que só pode ser observado sob uma perspectiva ou outra? Essa leitura realista é interessante, mas não era assim que Bohr pensava. Pode-se dizer que Bohr era um “instrumentalista” ou “positivista” (apesar deste último termo ser impreciso, e Bohr até rejeitá-lo), ou seja, para ele a tarefa da ciência seria descrever o que se pode observar, e não especular metafisicamente sobre aquilo que está para além das possibilidades de observação.

Não me aprofundarei agora nessa noção de complementaridade de Bohr, que apresentamos aqui como sendo a “dualidade onda-partícula para arranjos experimentais”. Ao invés disso, eu queria só comentar a importância que este princípio adquiriu para o pensador dinamarquês. Ele começou a aplicar a noção de complementaridade para várias áreas do saber.

De início, supôs que haveria uma complementaridade na biologia, entre a unidade de um ser vivo e a sua análise física, mas no final de sua vida abandonou esta idéia. Uma das origens da concepção de Bohr era a psicologia de William James, de onde ele derivou uma complementaridade entre pensar e sentir: se tento pensar sobre aquilo que estou sentindo, eu deixo de sentir aquilo. Na ética, sugeriu uma complementaridade entre justiça e compaixão, e na linguagem, entre o uso de uma palavra e sua definição estrita.

Bohr encontrou na filosofia chinesa do *yin-yang* uma expressão antiga de sua concepção filosófica, tanto que colocou o tradicional símbolo do yin-yang no centro do brasão que desenhou quando foi agraciado com a Ordem do Elefante da Dinamarca (ver figura). O lema do brasão é *contraria sunt complementa* (contrários são complementares).



Consultando meu manual de ciência chinesa, o *Science and Civilization in China* de Joseph Needham (vol. 1, p. 154), vejo que os termos “yin” e “yang” denotavam originalmente o lado sombreado e o lado ensolarado de morros e casas, e que em torno do séc. IV a.C. eles passaram a ter um sentido filosófico mais amplo, com o yin representando o escuro, fraco, feminino, noite, lua, etc., e o yang o iluminado, forte, masculino, dia, sol, etc. A meta dos filósofos do yin-yang era atingir uma vida humana com um balanço perfeito entre os dois princípios.

Com relação à filosofia de Bohr, em português, há um excelente artigo de Gerald Holton publicado na revista *Humanidades*, nº 9 (1984), pp. 49-71, da Universidade de Brasília, intitulado “As Raízes da Complementaridade”. Além disso, há diversos textos de divulgação escritos pelo próprio Niels Bohr, publicados no livro *Física Atômica e Conhecimento Humano*, da Editora Contraponto, 1995.

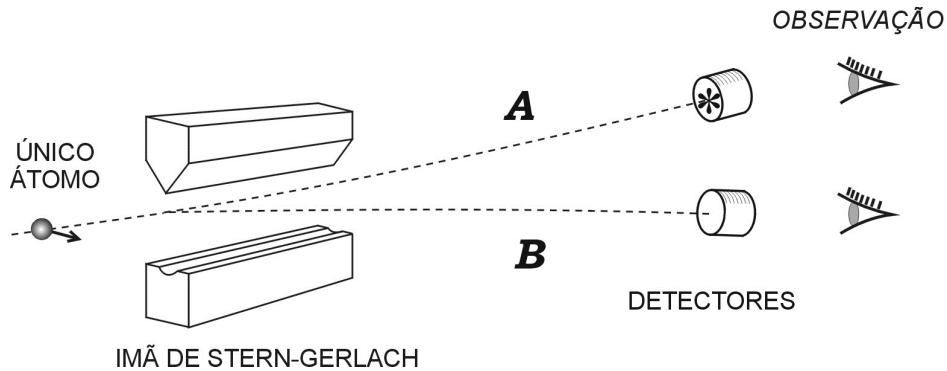
11. O Dilema do Místico

O dilema do místico ou do religioso, em face da ciência, é o seguinte: deve-se aceitar a existência de fenômenos que vão contra o que prevê a ciência estabelecida, ou deve-se aceitar apenas a existência de entidades e processos que não entram em contradição com a ciência? Chamarei o primeiro de misticismo “desafiador” da ciência, e o segundo de misticismo “conciliador” com a ciência.

Por exemplo, deve-se aceitar que o ser humano evoluiu a partir de outros primatas, ao longo de milhões de anos, ou deve-se acreditar que ele foi criado por Deus de forma já acabada? Alguém que acredite em Deus e em outros mistérios, mas que aceita a evolução humana, está adotando uma postura *conciliadora* com a ciência. Neste caso, o texto da Bíblia deve ser interpretado de maneira figurada, e não de maneira literal. Já os chamados “criacionistas” adotam uma postura *desafiadora* da ciência.

Sabemos que a física quântica pode ser interpretada de maneira mística. Nos últimos anos, o físico indiano Amit Goswami tem se destacado na mídia, defendendo uma interpretação “idealista” da teoria quântica. Uma de suas teses centrais é que a consciência humana seria responsável pelo colapso da onda quântica. Já vimos, no texto “A Consciência Legisladora”, que esta tese remonta à década de 1930, e ela é perfeitamente consistente com os resultados da física quântica, apesar de a maior parte dos cientistas não aceitá-la. Defender que o observador consciente é quem causa o colapso da onda é um exemplo de misticismo conciliador com a ciência.

A figura abaixo representa um experimento quântico simples, em que o cientista pode observar o átomo no detector A ou no B. Antes da detecção, não se pode dizer que o átomo esteja em uma posição definida (ver texto “O Problema da Medição”). Porém, ao ser detectado ele irá aparecer em um dos detectores de maneira bem definida: na figura ele aparece no detector A. Antes da detecção, a probabilidade de aparecer em A é $\frac{1}{2}$ (ou seja, 50%), e de aparecer em B é também $\frac{1}{2}$. A física quântica é a teoria que fornece as probabilidades para diferentes tipos de arranjos experimentais.



Segundo a teoria quântica, no experimento da figura, o observador não pode alterar as probabilidades de detecção simplesmente com sua vontade (a não ser que ele mexa no aparelho). No entanto, alguns autores afirmam que a vontade consciente do observador pode alterar os resultados de experimentos quânticos. De fato, dois engenheiros da prestigiosa

Princeton University, Robert Jahn & Brenda Dunne, realizaram experimentos, relatados no livro *Margins of Reality* (Harcourt, Brace & Jovanovich, 1987), em que afirmam que um observador consciente pode alterar as probabilidades em diferentes processos estocásticos (como o lançamento de uma moeda ou o experimento mencionado acima).

No entanto, os resultados de Jahn & Dunne não são levados a sério pelos cientistas “ortodoxos”. A razão principal é que tal efeito vai contra a visão “materialista” que permeia boa parte dos cientistas ortodoxos: segundo essa visão, a força de vontade da mente não pode afetar um objeto material externo ao corpo. Além disso, os resultados de Jahn & Dunne não foram reproduzidos por cientistas que trabalham em laboratórios respeitáveis.

Portanto, podemos concluir que Jahn & Dunne são místicos *desafiadores* da ciência (e não conciliadores com a ciência, no sentido exposto no primeiro parágrafo). Goswami também tem adotado uma postura desafiadora com relação à ciência. Em seu livro *A Física da Alma* (Aleph, 2005), e também no programa *Roda Viva* exibido na TV Cultura em 11/02/08, ele defende a veracidade do experimento realizado pelo mexicano Jacobo Grinberg-Zylberbaum e colaboradores, que envolve uma transmissão instantânea de pensamento à distância. Mesmo que alguns outros cientistas tenham obtido resultados semelhantes, como salienta Goswami, tal resultado é inaceitável para a ciência ortodoxa, pois uma transmissão instantânea de informação macroscópica violaria a teoria da relatividade restrita de Einstein.

Mais para frente discutiremos a instigante questão da não-localidade quântica, e veremos porque ela não pode ser usada para transmitir informação instantânea. De qualquer forma, é importante ficar claro que o experimento de Grinberg-Zylberbaum contradiz a teoria quântica, pelo menos a teoria quântica aceita hoje, de forma que a defesa deste experimento equivale a uma postura desafiadora da ciência.

Quem tem razão? Qual é a verdade? Cada um terá que adotar uma opinião por conta própria. A ciência ortodoxa é fruto de um método bastante rigoroso e frutífero, mas deve-se reconhecer que as teorias científicas mudam com o tempo, de forma que não há certeza que a posição materialista sobreviverá à próxima grande revolução nas neurociências. Por outro lado, o ser humano tem um imenso desejo de que a morte não seja simplesmente o fim do indivíduo, de forma que talvez o misticismo quântico seja apenas um produto desse desejo de vida eterna e comunhão universal.

Cada um terá que decidir por si mesmo. E nessa escolha, o místico e o religioso têm que levar em conta o dilema mencionado no presente texto: restringir-se a uma postura *conciliadora* com a ciência, em que o misticismo não entra em choque com a ciência ortodoxa, ou arriscar uma posição *desafiadora* da ciência, que poderia levar a uma grande revolução científica, mas que corre o risco de ser falseada quando o consenso a respeito dos resultados experimentais finalmente se formar.

12. O Princípio de Incerteza

Durante alguns meses, em 1927, Werner Heisenberg defendeu a visão de que *qualquer* fenômeno quântico poderia ser descrito completamente em termos ondulatórios, e que este mesmo fenômeno *também* poderia ser descrito completamente em termos de partículas. Vimos no texto “O Yin-Yang da Complementaridade” que esta visão acabou sendo superada

Uma das razões para Heisenberg defender essa visão mencionada acima envolvia o “princípio de incerteza” que, aplicado na “difração” (considerado um fenômeno ondulatório pela física clássica), permitia uma explicação corpuscular deste efeito. Vejamos então como isso pode ser feito.

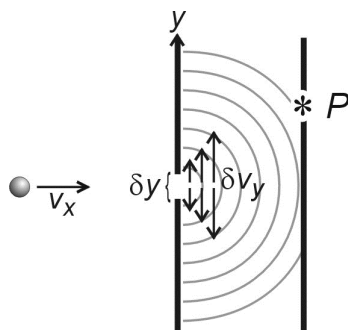
No entanto, pelo princípio de incerteza, não é possível que estas duas grandezas, posição e velocidade, tenham simultaneamente valores exatos. Se nós reduzirmos ao máximo a incerteza (ou melhor, a indeterminação) da posição de um átomo, ou seja, se δx for próximo de zero, isso terá como consequência que a velocidade *não será definida de maneira exata*, mas terá uma indeterminação de δv_x , de tal forma que o produto $\delta x \cdot \delta v_x$ será sempre *maior* do que uma certa constante, de valor $h/4\pi m$ (m é a massa do corpo e h a chamada “constante de Planck”). Isso costuma ser expresso matematicamente da seguinte maneira: $\delta x \cdot \delta v_x \geq h/4\pi m$.

– Mas como indeterminada? O piloto falou que estava a *exatos* 235 km/h!

Vemos, com este diálogo fictício, que o efeito do princípio de incerteza é bem pequenininho, e só se torna relevante na escala dos átomos.

22

a difração. A idéia era a seguinte. A fenda por qual passa a luz é bem pequeninha, de forma que a incerteza δy na posição da luz, ao passar pela fenda, é muito pequena. Conseqüentemente, pelo princípio de incerteza, a incerteza δv_y é relativamente grande. A figura abaixo mostra qual é o eixo dos y , e as diferentes setas verticais indicam diferentes valores possíveis da velocidade v_y .



Antes da medição em P , a componente da velocidade v_y não está definida. Diz-se que ela está em uma *superposição* de valores bem definidos de velocidade, ou seja, é como estivesse em todas ao mesmo tempo (em um nível de potencialidade).

Porém, quando o fóton aparece no ponto P , completa-se a medição, e ocorre um colapso para um dos valores bem definidos de velocidade, digamos v_{y0} .

E agora, vem algo filosoficamente incrível. Após terminada a medição, podemos interpretar a situação de certa maneira e dizer que, ao passar pela fenda, a posição y era bem definida e exata, e a velocidade v_{y0} *também*! Ou seja, segundo esta interpretação, *o princípio de incerteza não vale para o passado*! Ele apenas limita medições presentes e futuras!

13. A Escolha Demorada

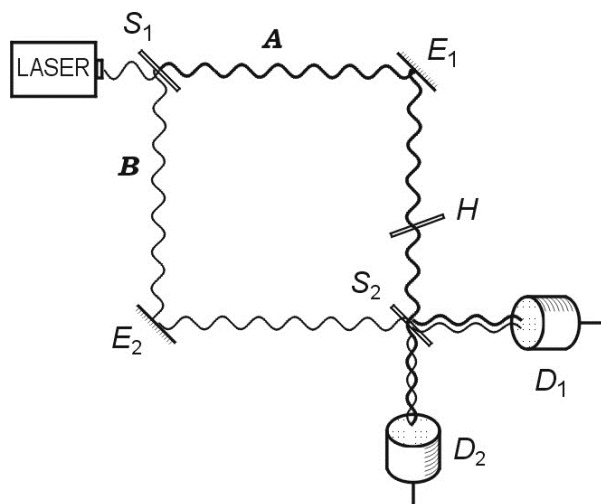
O leitor José M. Medeiros me perguntou a respeito do experimento de escolha demorada (ou retardada), que aparece no livro *A Física da Alma* (Ed. Aleph, 2005) de Amit Goswami. Este autor conclui que “um objeto quântico percorre um caminho [como uma partícula] ou ambos [como uma onda], exatamente em harmonia com nossa escolha” (p. 58). Ou seja, a realidade seria determinada pela escolha consciente do observador! Isso é cabível?

No texto “O Dilema do Místico”, defini duas atitudes possíveis do místico, em face da física quântica. A atitude “desafiadora” vai contra as evidências experimentais aceitas pela ciência ortodoxa, ao passo que a atitude “conciliadora” é consistente com elas. Em muitas partes de sua obra, Goswami desafia a ciência ortodoxa, mas neste trecho ele apresenta uma interpretação possível da teoria quântica (dentre dezenas de outras maneiras diferentes de explicar o experimento), ou seja, sua análise deste experimento é de tipo conciliador com a ciência.

Para entender a questão, precisamos introduzir um equipamento experimental chamado “interferômetro de Mach-Zehnder”, retratado na figura abaixo. Uma fonte de luz (laser) emite uma onda contínua de luz, que se divide em duas partes em um vidro semi-refletor S_1 . Os

espelhos E_1 e E_2 redirecionam os dois componentes do feixe, de forma que eles se reencontram no espelho semi-refletor S_2 . Note, na figura, o que acontece para os componentes indo para o detector D_2 : o componente que veio de A cancela o componente que veio de B ! Isso é um exemplo de interferência destrutiva. Toda a luz que saiu do laser acaba caindo em D_1 (nada acaba chegando em D_2).

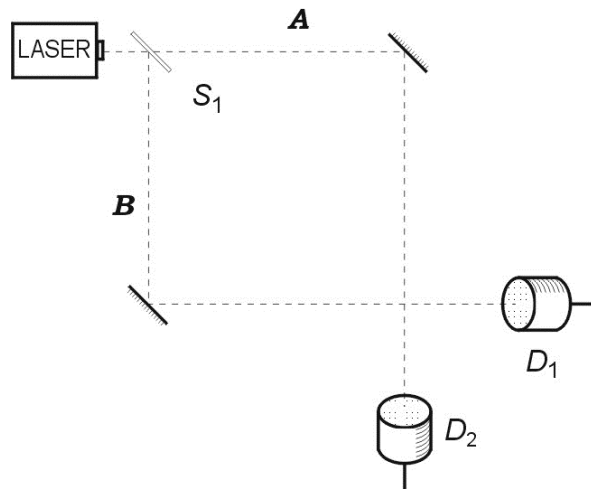
Isso é um bocado estranho! Pois se eu *tapar* o componente que vai por B , e só deixar livre o componente A , 50% da luz resultante cairá em D_2 . Mas se eu o *destapar*, voltando à situação inicial de soma de luz de A e B , 0% chega em D_2 . Ou seja, nessa situação, se eu tentar *bloquear* a luz (em B), acaba passando mais luz (em D_2)!



Isso ainda é um experimento clássico. Para se tornar quântico, duas coisas devem ser feitas: reduzir muito a intensidade do feixe de luz, e melhorar muito a sensibilidade dos detectores. Nesse domínio quântico, podemos agora aplicar a noção de *dualidade onda-partícula*, que introduzimos no texto “O Yin-Yang da Complementaridade”.

Quando um quantum de luz (“fóton”) aparece em D_1 , associamos a ele um fenômeno ondulatório. Ou seja, na terminologia introduzida por Niels Bohr, “só podemos compreender o fenômeno associando a ele o quadro conceitual da física clássica de *ondas*”. Não se pode associar uma trajetória única ao quantum detectado.

Porém, se retirarmos o espelho S_2 , a situação muda drasticamente, conforme a figura abaixo.



Agora, a luz pode cair tanto em D_1 quanto em D_2 . Se o fóton for detectado em D_1 , sabemos que trilhou o caminho **A**. Se o fóton for detectado em D_2 , sabemos que trilhou o caminho **B**. Como podemos inferir trajetórias passadas, segundo Bohr, “associamos a este fenômeno um quadro conceitual da física clássica de *partículas*”. Seu princípio de complementaridade diz que os fenômenos são ou ondulatórios ou corpusculares (associado a partículas), nunca ambos ao mesmo tempo.

Para entender o experimento da “escolha demorada”, falta um último elemento, que é o seguinte. A luz pode ser emitida em *pulsos curtos*, cujo instante de chegada nos detectores é previsível (dentro dos limites do princípio de incerteza). Assim, durante um certo intervalo de tempo, podemos dizer que o pulso “está dentro” do interferômetro, e podemos escolher retirar ou deixar o espelho S_2 , mesmo depois que o pulso passou pelo primeiro espelho semi-refletor S_1 . O que significa isso?

Para Bohr, só é possível “associar um quadro”, ondulatório ou corpuscular, após o término do experimento, quando uma observação é feita. Antes disso, devemos nos calar quando ao tipo de fenômeno. A razão disso é justamente o experimento de escolha demorada: se, quando o pulso está dentro do interferômetro, quiséssemos concluir apressadamente que o fenômeno é ondulatório, alguém poderia retirar o espelho S_2 e transformar o fenômeno em corpuscular! Assim, para Bohr, que conhecia este tipo de experimento – proposto em outro contexto por Carl von Weizsäcker, em 1931 –, um fenômeno só se completa com a medição (observação).

Note que Bohr não considera que a luz *é* ondulatória, ou *é* partícula. Bohr não é um “realista”, nesse sentido. Para ele, a tarefa da ciência não é dizer o que a luz “é”, mas sim fazer previsões sobre medições. Em sua interpretação, podemos associar “quadros conceituais” a diferentes experimentos, mas isso é diferente de dizer que a realidade *é* assim ou assada.

Em 1978, o físico norte-americano John Wheeler passou a discutir o experimento de escolha demorada com o interferômetro que vimos acima. No entanto, em sua discussão, ele passou a ter uma atitude mais “realista” para com os fenômenos ondulatório e corpuscular, como se eles existissem na realidade. Ao fazer isso, Wheeler chegou à conclusão de que é apenas quando o “observador participante” *decide* se o fenômeno será corpuscular ou ondulatório (deixando ou retirando S_2) é que a realidade passada adquire uma existência “atualizada”. Ou seja, antes disto, é como se o passado não existisse! Em suas palavras:

“É errado pensar naquele passado como ‘já existindo’ em todos os detalhes. O ‘passado’ é teoria. O passado não tem existência enquanto ele não é registrado no presente. Ao decidirmos quais perguntas o nosso equipamento quântico de registro irá fazer no presente, temos uma escolha inegável sobre o que temos o direito de perguntar sobre o passado.”

Assim, em sua interpretação da física quântica, pode acontecer de *o passado se atualizar apenas no presente!*

É a esta interpretação que Goswami se refere ao escrever que “as possibilidades tornam-se realidade de forma aparentemente retroativa, o que parece ser uma causação ‘à ré’”. Os fundadores da mecânica quântica encontraram semelhante problema com relação ao princípio de incerteza (ver o último parágrafo do texto “O Princípio de Incerteza”), mas não o interpretaram de maneira realista. Por exemplo, em 1930, Heisenberg escreveu que “este conhecimento do passado é de caráter meramente especulativo [...] É uma questão de crença pessoal se a tal cálculo referente à história passada do elétron pode ser atribuído qualquer realidade física ou não”.

Para finalizar, notemos que este poder que a consciência humana tem de determinar a natureza do fenômeno quântico (onda ou partícula) é diferente do poder, atribuído pela interpretação subjetivista (e compartilhada por Goswami – ver o texto “A Consciência Legisladora”), que a consciência teria de provocar um colapso do estado quântico. Neste segundo caso, o observador não pode escolher qual será o estado final do objeto quântico (ele apenas provocaria um colapso, sem poder decidir qual será o estado colapsado).

Já no experimento da escolha demorada, o observador tem um poder de escolha, mas esse poder é o mesmo poder que todos nós temos, por exemplo, para retirar ou deixar um lápis na mesa. Com isso podemos alterar o futuro de um objeto quântico, certamente. E se adotarmos a interpretação realista da complementaridade de Wheeler, podemos considerar que temos o poder de atualizar, ou mesmo alterar, o passado! Isso é consistente com o formalismo mínimo da teoria quântica, e com os experimentos quânticos. Mas não é a única maneira de interpretar a situação.

14. O que é a Ciência Ortodoxa?

Sou ateu, materialista, e cético em relação à parapsicologia. Tenho fé na ausência de Deus. Minha crença no materialismo é dogmática. Por isso, respeito outros dogmas, outras fés. Fui educado desta maneira. Lembro-me em cima de um rochedo com meu pai, olhando para o mar, e sentindo a dignidade de encarar a vida e a morte de acordo com as evidências da observação, sem mitos consoladores.

Conversando com colegas místicos, discutindo a metafísica quântica, não é lícito que eu tenha a pretensão de conhecer melhor a verdade do que eles. Tenho minha visão de mundo, baseada na ciência ortodoxa, e eles têm as deles, baseadas numa interpretação mística dos resultados da ciência. A única coisa que posso legitimamente fazer – dado que adoto uma postura dogmática com relação ao materialismo – é apontar para meus colegas quais são as posições da ciência ortodoxa, quais são as posições místicas “conciliadoras” com os resultados da ciência, e quais são as posições místicas “desafiadoras” da ciência (ver o texto “O Dilema do Místico”).

Cada um terá que decidir por si só qual é a verdade. Geralmente, a verdade é uma só. Por exemplo: adotando uma definição da palavra “Deus”, ou Deus existe (fora de nossas mentes) ou Deus não existe. Mas nunca poderemos comprovar uma dessas afirmações, de forma que a aceitação de uma delas terá que envolver uma dose de fé. Ou então, podemos adotar uma postura “agnóstica”: dado que nunca comprovaremos se Deus existe ou não, então é melhor suspendermos nosso juízo com relação a esta questão. Tal atitude, de evitar nos envolvermos em questões “metafísicas”, é típica da tradição do *positivismo*, que marcou a ciência durante muito tempo.

Com este último parágrafo, adiantei uma das respostas à questão que quero analisar no presente texto. E a questão é a seguinte: o que é a ciência ortodoxa? Quando afirmo que a ciência ortodoxa não aceita, por exemplo, os resultados dos experimentos de Masaru Emoto – que defende que a estrutura cristalina da água é afetada pelas emoções humanas –, a que visão de mundo estou me referindo?

Parece-me que a chamada “ciência ortodoxa” inclui duas posições diferentes: a materialista e a positivista. A ela se opõe uma interpretação mística da ciência, que podemos chamar de “naturalismo animista”, e que tem tido um papel de destaque ao longo de toda história da ciência, como explicarei mais abaixo. Todas são visões de mundo “naturalistas”.

Há basicamente três grandes pontos de partida para as visões sistemáticas de mundo. (i) A abordagem *mítica* ou *religiosa* parte do sobrenatural, de Deus ou de diversos deuses com características humanas. (ii) A abordagem *naturalista* parte da Natureza, com suas leis e regularidades, e procura explicar tudo, inclusive o homem, a partir das ciências naturais. (iii) A abordagem *humanista* ou *subjetivista* assume que o homem é a medida de todas as coisas, ou então que o ponto de partida do conhecimento é o sujeito pensante, que é anterior à ciência. Esses pontos de vista não são necessariamente excludentes, mas ao longo da história podemos classificar boa parte dos sistemas filosóficos e visões de mundo dentro de uma dessas três classes.

O debate sobre misticismo e física quântica se dá basicamente dentro do *naturalismo*. Esta é uma atitude de valorização da nossa experiência e da natureza. Ela considera que a experiência se refere a um mundo que possui uma certa unidade e segue leis, e não sofre ingerências de almas antropomórficas. É uma posição que valoriza o conhecimento científico contemporâneo. Por exemplo, ao estudar uma questão filosófica, ela leva em conta os resultados da psicologia e da neurociência. Há pelo menos três grandes correntes dentro do naturalismo científico.

1) *Materialismo*. Esta é a tese de que tudo o que existe pode ser reduzido a entidades físicas, como matéria, energia, entropia, campos, etc. A alma humana seria fruto da matéria, de forma que, na morte do corpo, desapareceria também a nossa alma. Fora de nós, no mundo material, não haveria propósitos, intenções, vontades, racionalidade, mas apenas o comportamento espontâneo da matéria. A origem da vida é explicada como fruto do acaso e do mecanismo da seleção natural. Boa parte da ciência ortodoxa condiz com esta visão de mundo. Quando um fisiologista submete um camundongo a um certo estresse, corta-lhe a cabeça e mede a concentração de um hormônio em seu cérebro, ele está atuando de forma condizente com o materialismo, buscando as raízes materiais do comportamento. O materialismo atual não consegue explicar como surge a subjetividade, a consciência, como surge a “vermelhidão” que percebemos ao olharmos para um morango vermelho. Mas o sucesso crescente da abordagem materialista dá esperanças, para o cientista ortodoxo que vê o mundo desta maneira, que um dia os problemas difíceis da subjetividade serão desvendados, talvez após a

descoberta de novos princípios que regeriam a matéria. Podem-se delinear seis grandes fases na história do materialismo: o atomismo da Antigüidade greco-romana, o materialismo indiano (Carvaka), em parte a filosofia mecânica cristã do séc. XVII (como em Hobbes), o iluminismo do século XVIII, a ascensão da fisiologia e do evolucionismo no séc. XIX, e o realismo “fiscalista” atual (que retoma, na década de 1960, o espaço perdido para o positivismo). Vale notar que boa parte da discussão na filosofia da mente atual pressupõe o fiscalismo (que é sinônimo de materialismo), sendo marcada por um debate entre o reducionismo e o “emergentismo”.

2) *Positivismo*. A abordagem precedente pode ser chamada de “realista”, pois ela tece afirmações sobre como se comporta a realidade *não-observável*. O positivista, por seu turno, considera que isso é apenas especulação metafísica, e não tem lugar na ciência. O positivista leva à sério apenas as observações, os “dados positivos” obtidos pelos instrumentos científicos. Há, é claro, lugar para teorização, mas esta seria apenas uma maneira de sistematizar o nosso conhecimento – não devemos presumir que nossas teorias espelhem a realidade que está para além de nossa observação. Dizer que a matéria é o fundamento da realidade, ou que a alma desaparece na morte, careceria de sentido. Perguntado sobre qual é a explicação para a experiência subjetiva da “vermelhidão”, por exemplo, o positivista responderia tipicamente que esta pergunta está mal formulada, pois usa a linguagem de maneira inapropriada. O positivismo teve seu período áureo na ciência mais ou menos entre 1870 e 1970, e ele foi muito forte nas interpretações ortodoxas da física quântica.

3) *Naturalismo animista*. Assim como o materialismo, esta visão busca os segredos da Natureza de maneira “realista”, mas – ao contrário dos materialistas, que consideram que esta realidade é inanimada – ela considera que a Natureza é dotada de uma espécie de alma, de uma “força” ou “energia” que a guia e dá sentido às nossas vidas. Historicamente, o naturalismo animista está associado ao nascimento da ciência, nas tradições do pitagorismo, estoicismo, taoísmo, hermetismo, astrologia e alquimia. No Renascimento, esta tradição teve bastante importância, sendo hoje conhecida como “naturalismo renascentista”. Um fenômeno como a atração magnética era visto como análogo à atração amorosa entre seres vivos (em francês, a palavra para ímã, *aimant*, tem a mesma raiz que *amour*). No século XIX, o naturalismo animista teve uma certa importância na ciência inglesa e alemã, estando associada ao movimento romântico. Na Alemanha, o filósofo Friedrich Schelling sistematizou esta abordagem, que veio a ser conhecida como *Naturphilosophie* (filosofia da natureza), influenciando a homeopatia, a antroposofia, etc. Na década de 1960, essa visão de mundo se fortaleceu novamente, com o movimento “nova era”, etc. Na ciência, no entanto, as posturas positivista e materialista continuaram dominando, e muitas das crenças científicas associadas a esta versão moderna do naturalismo animista são consideradas “pseudociência”, como a astrologia, a homeopatia e a parapsicologia.

Eis então um breve resumo de três grandes posturas nas ciências naturais. O que tenho chamado de “ciência ortodoxa”, e que talvez congregue em torno de 90% dos cientistas, parece se dividir principalmente nas atitudes materialista ou positivista. O misticismo quântico faria parte da terceira corrente científica, que chamei de “naturalismo animista” (por falta de um nome melhor), e que tem uma longa tradição na ciência, apesar de sua importância ter gradativamente diminuído ao longo dos séculos.

15. A Consciência é um Fenômeno Quântico?

Seria a consciência um fenômeno quântico? Ora, qualquer fenômeno microscópico é um fenômeno quântico. Assim, como nosso cérebro é constituído de entidades microscópicas, num sentido trivial nosso cérebro é quântico, assim como nossa consciência (supondo o “materialismo”, ver o texto “O que é a Ciência Ortodoxa?”).

Mas não é essa a pergunta interessante. Queremos saber se a física quântica é *necessária* para explicar a consciência, ou seja, se a física clássica é incapaz de explicá-la. Em poucas palavras, podemos dizer que o que a física quântica tem de essencial é que ela é uma teoria que *atribui propriedades ondulatórias para partículas individuais* (ver o texto “O Yin-Yang da Complementaridade”). Se um objeto se comportar às vezes como onda (exibindo franjas de interferência), às vezes como partícula (aparecendo como um ponto ou seguindo uma trajetória bem definida), então só a física quântica é capaz de descrever o objeto. Caso isso não aconteça, dizemos que o objeto se comporta classicamente.

Considere a absorção de luz pela retina. A física quântica é necessária para descrever este processo? Sabe-se que certos animais são sensíveis a apenas um quantum de luz, e assim este processo é corpuscular. No entanto, acredita-se que nenhuma das propriedades ondulatórias da luz são relevantes para o processo de absorção em si. As propriedades ondulatórias afetam a distribuição espacial dos fótons, mas a absorção em cada célula da retina independe do que está acontecendo em outras células. Assim, a física clássica seria suficiente para explicar a absorção de luz pela retina.

Existiria algum processo em nosso cérebro, essencial para a nossa consciência, que só pode ser explicado pela física quântica? A ligação entre consciência e física quântica foi sugerida na década de 1930, mas em um sentido diferente do que estamos examinando aqui. Naquela interpretação “subjetivista” da teoria quântica, a consciência seria responsável pelo “colapso” da onda quântica (ver o texto “A Consciência Legisladora”). Mas a tese que queremos examinar não é o papel da consciência na teoria quântica, mas o papel da teoria quântica nas teorias materialistas da consciência. Apresentarei aqui alguns argumentos em favor da tese de que a física quântica é essencial para a consciência, desenvolvidos há uns 15 anos atrás, quando este campo começava a despertar interesse (fico devendo um exame da literatura mais recente).

a) *O cérebro seria um “computador quântico”*. Este conceito foi bastante trabalhado pelo físico David Deutsch, que mostrou que tal computador seria mais eficiente do que um computador digital. Por seleção natural, essa vantagem computacional poderia ter favorecido um cérebro que fosse um computador quântico. O problema com este argumento é que o cérebro é muito quente para que tal computação quântica pudesse ocorrer.

b) *O cérebro computaria funções não-recursivas*. Computadores clássicos e quânticos só podem computar funções “recursivas”, mas o pensamento humano (por exemplo, a intuição matemática) extrapolaria esta limitação. Uma solução inovadora ao problema do colapso na mecânica quântica talvez solucionasse também esse problema da consciência, conforme sugestão do físico Roger Penrose. O problema aqui é que não se mostrou rigorosamente que o pensamento humano é capaz de computar funções não-recursivas.

c) *Um fenômeno quântico semelhante à “condensação de Bose” poderia ocorrer no cérebro*. Este fenômeno é observado a baixas temperaturas, quando um grande número de partículas se

comporta identicamente. O físico H. Fröhlich propôs, em 1968, um modelo biológico deste fenômeno de “coerência” à temperatura ambiente, envolvendo moléculas dipolares. Alguns pesquisadores afirmam ter encontrado evidência de que tal fenômeno ocorreria no cérebro, mas não há comprovação de que tais sistemas de fato existem em sistemas biológicos.

d) *O cérebro seria regido por leis análogas às da mecânica quântica.* Existe uma abordagem em neurociência que supõe que a convencional dinâmica do neurônio e da sinapse não é fundamental, e que as funções cerebrais podem ser descritas por um “campo dendrítico” que obedeceria a equações da teoria quântica de campos. Esta abordagem matemática foi inspirada na proposta de Karl Pribram, nos anos 60, de um modelo “holonômico” para o cérebro. Mas o fato de leis análogas às da mecânica quântica descreverem funções cerebrais não implica que tais funções constituam um fenômeno quântico. Além disso, em tais modelos não se introduzem medições que causam colapsos, o que sugere que a descrição destes autores é meramente ondulatória.

e) *A liberação de neurotransmissores é um processo probabilístico, que seria descrito apenas pela física quântica.* Tal liberação, chamada de “exocitose”, ocorreria com uma probabilidade relativamente baixa (de cada 5 impulsos nervosos chegando à vesícula sináptica de células piramidais do neocórtex, apenas 1 liberaria o neurotransmissor). De acordo com John Eccles, a mente (que em sua visão dualista existe independentemente do cérebro) poderia alterar levemente essas probabilidades de exocitose, o que constituiria um mecanismo para a ação da mente sobre o cérebro. Se ele estiver correto e a exocitose puder ser descrita pela teoria quântica, faltaria mostrar que a mecânica quântica é *necessária* para decrever este fenômeno, e de que forma este fenômeno estaria ligado com a emergência da consciência.

f) *A nível subneuronal ocorreria processamento de informação.* Nos anos 70 descobriu-se que as células possuem uma delicada estrutura formada por “microtúbulos” de proteína, formando um “citoesqueleto”. Como tais microtúbulos são cilindros com diâmetro de apenas 25 nanômetros (10^{-9} m), é razoável supor que eles só possam ser adequadamente descritos pela física quântica. Resta saber se de fato o citoesqueleto tem uma função cognitiva, além de sua função estrutural e de transporte.

g) *A mecânica quântica explicaria fenômenos de percepção extrasensorial.* Alguns autores partem do princípio de que a consciência pode exercer influência direta sobre processos naturais, e procuram mostrar como um modelo quântico da consciência daria conta deste e de outros tipos de fenômenos (ver menção a Jahn & Dunne, no texto “O Dilema do Místico”).

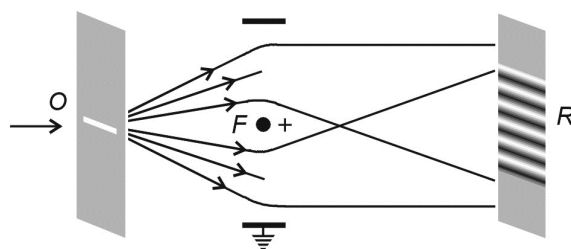
Em suma, parece-me não existe evidência concreta de que a física quântica seja necessária para explicar a consciência. É verdade, porém, que se trata de uma questão “empírica”, ou seja, só a ciência do futuro poderá dar uma resposta mais definitiva.

Por outro lado, é plausível supor que o mistério da consciência deva envolver algum princípio científico novo, além do fato de que a consciência se origina em um sistema altamente complexo, como nosso cérebro. Qual será este princípio novo? Talvez obtenhamos uma resposta neste século XXI.

16. Interpretando o Experimento da Fenda Dupla

No texto “A Primeira Lição de Física Quântica”, demos uma olhada no experimento da fenda dupla no regime quântico, em que pontinhos vão aparecendo na tela detectora, até formar franjas de interferência. Se o experimento for realizado com luz, os pontinhos recebem o nome de “fótons”. Experimentos semelhantes já foram realizados com elétrons, nêutrons e até átomos inteiros.

Na figura abaixo, mostra-se um experimento feito com *elétrons*, em que aparecem as franjas de interferência. Ele se chama “biprisma de elétrons”, e foi realizado por Möllenstedt & Düker em 1956. Os elétrons passam pela fenda *O* e o feixe diverge, passando por ambos os lados de um fio *F* carregado positivamente. Este fio atrai os dois lados do feixe de elétrons, que interferem na região *R*.



Não há dúvidas sobre aquilo que se observa, mas há diferentes interpretações com relação ao que ocorre na *propagação* dos elétrons (antes da detecção). O fato de se formar uma franja de interferência (após a incidência de milhares de elétrons) indica que alguma coisa parecida com uma onda deve estar associada a cada elétron. Relembremos que as franjas de interferência se formam mesmo quando cada elétron entra *sozinho* no aparelho.

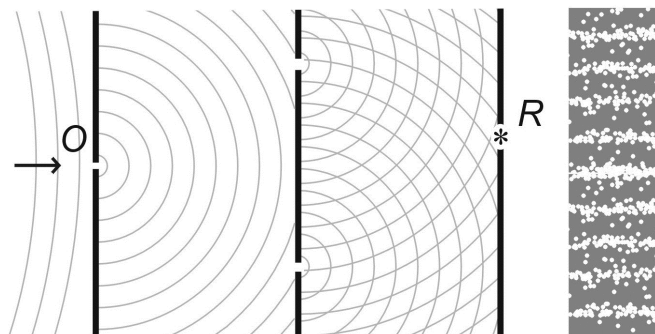
Vejamos três interpretações possíveis para este experimento:

1) *Interpretação Ondulatória Realista*. O elétron, na verdade, seria uma entidade espalhada oscilante, com sua massa e carga elétrica espalhadas no espaço como uma nuvem. Quando essa onda é detectada, ela “colapsa” e fica com dimensões bem reduzidas, parecendo um ponto.

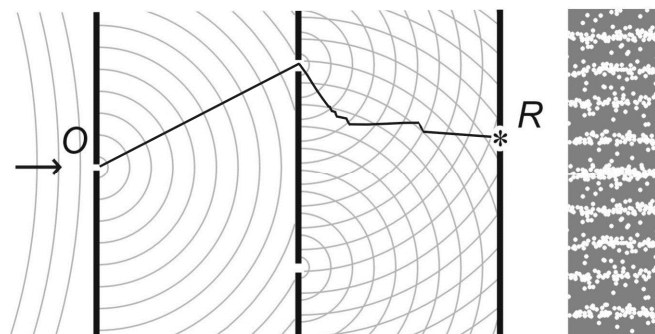
2) *Interpretação Dualista Realista*. O elétron teria duas partes: uma delas seria semelhante à onda mencionada no item anterior, só que ela não carregaria massa, carga ou energia; a outra parte seria um corpúsculo, uma partícula que carrega a massa e a carga do elétron. O ponto na tela detectora corresponderia sempre à localização do corpúsculo, ao passo que a onda nunca seria observada diretamente. A onda serve para “guiar” o corpúsculo, que se comporta como um surfista, rumando apenas onde há ondas. Esta interpretação foi primeiramente formulada por Louis de Broglie, em 1927, e depois aperfeiçoada por David Bohm, em 1952.

3) *Interpretação da Complementaridade*. Um “fenômeno” ou é ondulatório, exibindo franjas de interferência, ou é corpuscular, caso em que se pode associar uma trajetória ao quantum detectado (ver o texto “O Yin-Yang da Complementaridade”). No exemplo acima, temos um fenômeno ondulatório. Assim, não faria sentido associar uma trajetória ao quantum detectado, ou seja, ele não deve ser pensado como uma partícula que passou por um lado bem definido do fio *F* da figura (ou por uma fenda bem determinada). Perguntado como uma onda espalhada poderia ser observada como um ponto na tela, Niels Bohr não costumava falar em “colapso da onda”, mas invocava o “postulado quântico” do físico Max Planck.

No caso do experimento da dupla fenda com *luz*, visto no texto “A Primeira Lição de Física Quântica”, temos dois retratos possíveis para o que acontece na propagação da luz. A interpretação ondulatória e a complementaridade concordam neste caso, ao associar apenas ondas ao objeto quântico, como na figura abaixo.



Já a interpretação dualista realista imagina que a partícula segue uma trajetória em zigue-zague, como na figura abaixo. Tal surfista teria uma velocidade altíssima nas regiões escuras, de forma a reduzir a praticamente zero as chances de ser detectado nestas regiões.



Figuras análogas a essas duas se aplicariam para o experimento do elétron, descrito no início deste artigo.

O que fizemos neste texto foi explorar um domínio do não-observável na ciência. Será que a ciência deve emitir opiniões sobre aquilo que não é observável? Um realista diria que sim, um positivista diria que não (para uma definição desses termos, ver o texto “O que é a Ciência Ortodoxa?”). De qualquer forma, essa discussão sobre coisas que não podem ser testadas experimentalmente é chamada de discussão sobre a *interpretação* de uma teoria científica.

17. O Primeiro Debate Einstein-Bohr

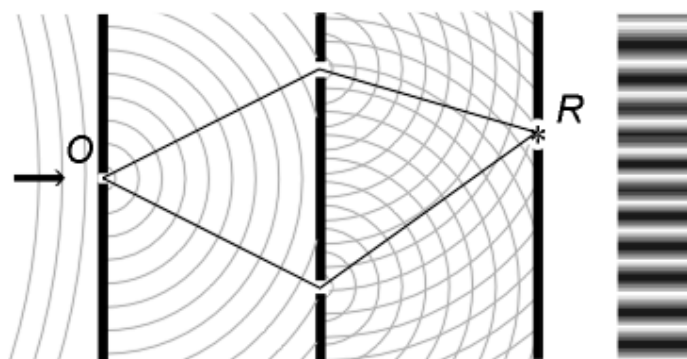
Em outubro de 1927, realizou-se em Bruxelas o 5º Congresso de Física do Instituto Solvay, e o assunto principal era a nascente Mecânica Quântica. Nesse momento, começava a se consolidar a chamada “interpretação ortodoxa” ou “de Copenhague”, centrada na concepção de complementaridade de Niels Bohr (ver o texto “O Yin-Yang da Complementaridade”) e no princípio de incerteza, formulado por Werner Heisenberg (ver o texto “O Princípio de Incerteza”).

Nesta conferência, estava presente o maior físico da época, Albert Einstein. A foto oficial do evento inclui 19 Prêmios Nobel (obtidos antes e depois do congresso):



Einstein estava insatisfeito com a interpretação de Bohr e Heisenberg. Segundo estes, o *princípio de incerteza* proibia que uma partícula tivesse, ao mesmo tempo, valores exatos de posição e velocidade; e o *princípio de complementaridade* proibia que, em um fenômeno ondulatório – como o experimento da dupla fenda, que vimos nos textos “A Primeira Lição de Física Quântica” e “Interpretando o Experimento da Dupla Fenda” –, pudesse-se afirmar que o “quantum” detectado seguira uma trajetória bem definida, passando por uma fenda bem determinada.

Refresquemos nossa memória com relação a esse problema. Na figura abaixo, representa-se a detecção de um único quantum no ponto *R*. O quantum aparece como um *ponto* na tela (lembramos que o acúmulo de milhares desses pontos forma o padrão de interferência esboçado do lado direito da figura), e isso sugere que o quantum corresponda a uma partícula, que segue uma trajetória bem definida. Mas por qual fenda teria passado essa partícula?



Bohr afirmava que esta pergunta não tinha resposta. Neste fenômeno ondulatório (ou seja, que exibe franjas de interferência), não faria sentido atribuir trajetória ao quantum detectado. Não se trata de uma questão de ignorância: não é que o quantum passa por uma das fendas e nós nunca saberemos por qual fenda ele passou. É mais do que isso! Na propagação, o quantum não se comporta como partícula! Ele passa por ambas as fendas!

No Congresso de 1927, onde Bohr apresentou uma palestra sobre sua concepção, Einstein buscou uma maneira de refutar seu amigo. Sua idéia, basicamente, era colocar detectores após as fendas para medir a trajetória dos quanta. No entanto, a interação do detector com o objeto quântico provocaria um razoável distúrbio neste objeto, e o padrão de interferência desapareceria. Determinaríamos a trajetória, mas perderíamos o típico padrão de ondas, o que estaria de acordo com o princípio de complementaridade (o “fenômeno” seria corpuscular). Assim, o que Einstein teria que fazer era bolar uma maneira de determinar a trajetória *sem perder* o padrão de interferência: com isso refutaria Bohr!

Certa tarde, Einstein apareceu com uma idéia genial (ver foto abaixo, tirada no Congresso). Olhando para a figura acima, suponha que o quantum descreva uma trajetória bem definida, passando pela fenda de cima. Este quantum iria ricochetear no anteparo contendo as fendas, antes de se dirigir para a tela detectora. Ora, se ele ricocheteia, ele deve transferir “momento” para o anteparo. Por exemplo, se jogo uma bola de tênis em uma porta entreaberta, esta porta irá se mover, pois há transferência de momento (e de energia) da bola para a porta.



A idéia de Einstein então era a seguinte: *após* o quantum chegar na tela detectora, bastaria analisar se o anteparo recebeu um impulso “para cima” ou “para baixo” (em relação à orientação da figura). Esta medição não provocaria um distúrbio no quantum, mas nos daria a informação necessária para determinar por qual fenda ele passou! A interpretação de Bohr estaria assim refutada!

Bohr passou boa parte da noite em claro, pensando no desafio do seu rival. Na manhã seguinte, apareceu sorridente, com uma resposta! A chave de sua resposta era que o anteparo (onde ficam as fendas) deveria estar sujeito ao princípio de incerteza. Se este anteparo fosse suspenso em molas, de forma a que se pudesse medir sua velocidade (para cima ou para baixo) após a passagem do quantum, então, pelo princípio de incerteza, *sua posição não seria bem determinada* (o princípio de incerteza diz que se a velocidade é bem definida e exata, a posição terá que ser mal definida; ou vice-versa). Ou seja, não se poderia controlar com exatidão a posição das fendas. Mesmo que insistíssemos que um padrão de interferência se formaria, tal padrão se deslocaria (para cima ou para baixo) a cada novo quantum (pois, segundo o princípio da incerteza aplicado ao anteparo, a posição das fendas seria diferente a cada novo quantum). Assim, é como se esses padrões de interferência ficassem tremidos, borrando o resultado final que é visível na tela, após milhares de quanta passarem pelo sistema. Segundo os cálculos relativamente simples de Bohr, a incerteza na posição das fendas seria suficiente para borrar completamente o padrão de interferência. Ou seja, mesmo esta idéia de Einstein, de medir o momento (ou velocidade) do anteparo após a detecção do quantum, acabaria eliminando as franjas de interferência. Saberíamos as trajetórias, mas perderíamos as franjas ondulatórias. Exatamente como requerido pelo princípio de complementaridade do dinamarquês.

Bohr ganhou a batalha! E isso contribuiu muito para a aceitação da interpretação de Copenhague. Três anos depois, em 1930, no 6º Congresso de Solvay, um novo desafio foi lançado por Einstein (envolvendo o princípio de incerteza para energia e tempo), e Bohr, novamente, conseguiu uma resposta (desta vez utilizando a própria teoria da relatividade geral, formulada por Einstein)!

A essa altura, a atitude de Einstein, desafiadora da interpretação ortodoxa da teoria quântica, já era vista pela maioria dos físicos como uma limitação, um preconceito de um físico de

mentalidade antiquada. O debate parecia encerrado. Porém, em 1935, Einstein lançaria seu desafio final (que veremos em breve)!

O relato feito acima pode ser encontrado com mais detalhes no livro de Bohr, *Física Atômica e Conhecimento Humano*, Ed. Contraponto, Rio de Janeiro, 1995, pgs. 53-65 (texto original de 1949). Já a figura abaixo, retratando um certo momento do debate de 1927 (segundo relato de Bohr, na p. 59 do livro supracitado), foi retirada do livro de HQ *Suspended in Language*, escrito por Jim Ottaviani e ilustrado por Leland Purvis (General Tektronics Labs). Einstein exclama “Deus não joga dados”, criticando o princípio de incerteza, ao que Bohr responde: “Você não acha que deveríamos ser cautelosos ao usarmos a linguagem ordinária para atribuir propriedades a Deus?”



18. Teorema de Bell para Crianças

O teorema de Bell é um dos assuntos mais “sutis” da física moderna. Todo mundo acha importante, mas ninguém sabe ao certo porquê! O nome de John Stuart Bell foi proposto para ganhar o Prêmio Nobel, mas como seu teorema não forneceu uma aplicação prática, ele não poderia ganhar. Mesmo assim, alguns acham este resultado o mais “profundo” da física teórica das últimas décadas. Será que é?

Segundo alguns, o teorema de Bell diz que existe *não-localidade* na natureza. Mas as coisas não são tão simples assim. Vejamos primeiramente o que é esta “não-localidade”.

Você deve saber que Isaac Newton descobriu a força da gravidade, não sabe? A Terra atrai a Lua e a Lua atrai a Terra e, como resultado, a Lua fica girando à nossa volta. Para Newton, esta força é instantânea. Ou seja, se um gigante super-poderoso, maior do que todos os monstros que você já viu, desse um peteleco imenso na Lua, e a Lua saísse voando para os confins do Universo, quem estivesse na Terra sentiria um baque no mesmo instante do peteleco (segundo Newton)!

Só que, na verdade, não é isso que aconteceria. Na verdade, demoraria 1,3 segundos depois do peteleco para você sentir o baque gravitacional e ver a Lua desaparecer! Por quê? Porque os efeitos na natureza se propagam a uma velocidade finita, igual à velocidade da luz (quem descobriu isso, no caso da gravidade, foi Albert Einstein). Um nome dado a isso é

“localidade”. Nenhuma informação pode ser transmitida instantaneamente. Se você telefonar para alguém no Japão, demora pelo menos 1/15 de segundo para a sua voz ser ouvida por ele.

Em 1926, uma nova teoria foi descoberta para explicar os átomos e a radiação. Chama-se Física Quântica. O mundo da Física Quântica é muito estranho! Uma das coisas estranhas é que, para *duas* partículas, parece que algo que acontece para uma delas pode se propagar instantaneamente para a outra. Ou seja, a teoria quântica parece funcionar de maneira “não-local”.

Mas será que a realidade mesma é não-local, ou essa não-localidade é algo que aparece só na teoria? Um dos primeiros a pensar profundamente nisso foi, de novo, nosso amigo Einstein, em 1935, juntamente com seus colegas Podolsky e Rosen.

Outro que pensou nesses assuntos, em 1952, foi o David Bohm, que na época veio morar em São Paulo, pois ele era perseguido político nos Estados Unidos. Ele bolou uma versão da teoria quântica que fala de uma realidade na qual uma causa pode se propagar instantaneamente. É uma teoria na qual a realidade é não-local!

Aí veio o Bell. Nascido na Irlanda do Norte, ele trabalhava no maior acelerador de partículas do mundo, o CERN, na Suíça. Nas horas vagas, ele pensava nessa estória de não-localidade, na teoria de Bohm, quando de repente teve uma idéia!

A teoria de Bohm pode ser chamada de “realista”, pois ela fala que existe uma realidade física, com “variáveis ocultas”, que ninguém jamais pode observar diretamente. A idéia de Bell era de que talvez *toda teoria física realista*, que queira prever tudo o que a Física Quântica preveja, tenha que ser *não-local*, como a teoria de Bohm. O grande mérito de Bell foi ter feito a pergunta certa: será que toda teoria quântica realista tem que ser não-local? Feita a pergunta, não demorou muito para ele conseguir demonstrar a resposta: sim! Nascia assim o famoso “teorema de Bell”.

Este teorema diz o seguinte: há uma certa grandeza cujo valor, para qualquer teoria quântica *realista local*, é sempre *menor ou igual* ao número 2 (trata-se portanto de uma desigualdade). Já para a teoria quântica usual este valor pode ser maior do que 2. A teoria do Bohm é realista não-local, então o valor pode ser maior do que 2. A maioria dos físicos da época interpretava a Teoria Quântica de maneira “não realista”, então, para eles, o valor também poderia ser maior do que 2.

Isso foi em 1964. Demoraram vários anos para os outros físicos entenderem o que Bell quis dizer. Na década de 1970, eles fizeram uns experimentos e confirmaram que o valor da grandeza mencionada poderia ser maior do que 2, ao contrário do que previam as teorias realistas locais.

Quais então as conseqüências do teorema de Bell? A natureza é não-local? Bem, depende de como você interpreta a Teoria Quântica. O dilema é se devemos rejeitar o realismo ou a localidade.

1) Se você acha que a Física Quântica só serve para prever resultados de experimentos, e não para falar de uma realidade que existe mesmo quando não tem ninguém observando (ou seja, se você rejeita o realismo), então você pode ir dormir tranquilo, pois as coisas que você observa e mede se comportam de maneira local. Não é possível uma pessoa se comunicar com

outra instantaneamente, e não há nenhuma “onda quântica” que exista de verdade e que sofra alterações não-locais.

2) Se você pensa como o Bohm, e acha que a Teoria Quântica descreve a realidade, mesmo quando não tem ninguém observando, então você acredita na não-localidade. É impossível as pessoas se comunicarem instantaneamente, mas haveria alguma coisa na natureza, talvez a onda quântica, que transmite um efeito causal instantaneamente a grandes distâncias. Isso é às vezes chamado de “ação à distância”.

3) Há uma terceira posição, que não fala em “ação à distância”, mas fala jocosamente em uma “paixão à distância”. Ela é uma visão parecida com a de Bohm, sendo realista, mas não haveria um efeito “causal” entre partes distantes. Partículas distantes poderiam estar “correlacionadas”, exibindo propriedades semelhantes, sem que houvesse uma causa comum para este comportamento semelhante. Ou seja, duas coisas poderiam passar a ter um certo valor ao mesmo tempo, de maneira não-local, sem que houvesse algo que “causasse” este valor.

Essa é uma situação engraçada. Pois não há uma única explicação para um experimento físico, mas há duas ou mais. Os cientistas não gostam disso: eles gostariam que houvesse uma única resposta, mas hoje em dia não há. Será que no futuro a gente vai descobrir? Ninguém sabe. Talvez você possa um dia ajudar a humanidade a descobrir esta resposta, ou a desvendar outros mistérios da ciência.

19. Naturologia, Teoria Quântica e o Efeito Placebo

O termo “naturologia” se refere ao campo de práticas terapêuticas que não se enquadra na medicina alopática ou nas linhas clássicas de psicanálise e psicoterapia, e que se utilizam de plantas medicinais, de técnicas terapêuticas tradicionais do oriente, e de técnicas mais recentes que se caracterizam por não serem invasivas, como a iridologia, fitoterapia, aromaterapia, etc. Segundo alguns naturólogos, o objetivo não é “curar” doenças, mas sim promover o bem-estar e o equilíbrio da pessoa com seu ambiente.

Olhando de fora, como leigo no assunto, imagino que essas práticas terapêuticas “funcionem”, já que a área tem se expandido e os relatos dos “interagentes” (termo que às vezes substitui o “paciente”) costuma ser positivo. Há atualmente dois cursos superiores em naturologia no Brasil, na Universidade Anhembi-Morumbi, em São Paulo, e na Unisul, na região metropolitana de Florianópolis. Em maio de 2008, foi realizado o I Congresso Brasileiro de Naturologia, em São Paulo. Porém, esses cursos não são reconhecidos pelo MEC, e a profissão enfrenta dificuldades para ser regulamentada. Por quê?

Basicamente, a questão é que as teorias usadas para justificar a naturologia não são consideradas científicas pela ciência estabelecida, e as evidências experimentais em favor da eficácia das terapias alternativas não são muito melhores, aos olhos da ciência ortodoxa, do que a eficácia do chamado “efeito placebo”. Um exemplo da posição científica ortodoxa é o texto “Naturebologia”, facilmente encontrado na web, e escrito pelo físico Leandro Tessler, em blog sobre Cultura Científica.

Boa parte das explicações dadas às terapias alternativas envolve analogias criativas. Por exemplo, em um artigo do *Jornal Hoje* de 28/02/2002, argumenta-se que a cromoterapia teria

base científica, pois “a cor violeta contribui para a recuperação das pessoas que têm câncer porque ela é rica em potássio, e a cor vermelha ajuda pessoas que estão com anemia”. Esse tipo de raciocínio por semelhança sempre foi forte na tradição científica do “naturalismo animista” (ver o texto “O que é a Ciência Ortodoxa?”), na qual a naturologia se insere, mas só devemos acreditar em tais analogias se elas forem submetidas a testes experimentais bem controlados.

Uma abordagem à naturologia tem sido argumentar que ela é justificada pela teoria quântica. Pelo menos um dos cursos mencionados acima tem uma disciplina sobre física quântica, o que não deixa de ser uma maneira muito interessante de estender a cultura científica, de maneira conceitual, para fora das áreas de ciências exatas. Porém, é muito difícil explicar o relativo sucesso das técnicas de naturologia com base na teoria quântica. A física quântica se aplica bem para átomos e moléculas, mas os efeitos quânticos acabam sendo apagados quando há muitas partículas interagentes, como é o caso do nosso corpo. Mesmo o computador quântico, que é uma idéia espetacular desenvolvida nos últimos 25 anos, só pode funcionar para poucas partículas isoladas a baixas temperaturas (até agora, o único computador quântico real que foi construído tinha só sete partículas).

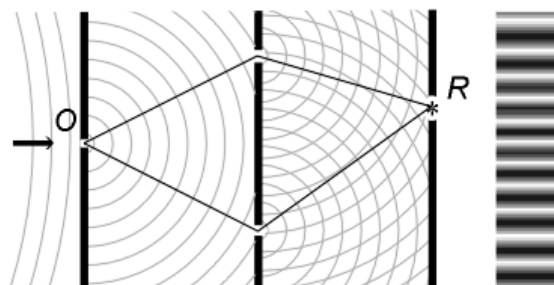
Existem muitos autores que defendem que haja uma física quântica da alma, ou uma psicologia genuinamente quântica, mas tais teorias não têm aceitação entre os cientistas ortodoxos. Os experimentos citados em defesa dessa extensão da física quântica para o domínio humano não são levados a sério pela ciência estabelecida. Assim, não é argumentando a partir da física quântica que a naturologia conquistará a aceitação das sociedades médicas e científicas.

Parece-me que uma estratégia argumentativa que poderia ser adota pelos profissionais da naturologia, possivelmente aliada a outros argumentos, é justamente a de que parte do sucesso da naturologia (ou mesmo todo o seu sucesso) provém da comprovada eficácia do efeito placebo. Este efeito envolve a seguinte situação. Pacientes que têm alguma doença e que são tratados apenas por meio da ingestão de uma pastilha inócua, contendo nada mais do que farinha e talvez um pouco de açúcar, acabam se curando da doença, a uma taxa maior do que aqueles que não recebem tratamento algum. A compreensão deste efeito se fortaleceu na década de 1970, quando se comprovou cientificamente que há uma ligação íntima entre os nossos sistemas neurológico e imunológico, num campo hoje conhecido como “neuroimunomodulação”. Um componente importante do efeito placebo é a relação de cuidado e atenção que se estabelece entre o médico e o paciente, às vezes denominado “efeito não-específico”.

O efeito placebo não dever funcionar se o paciente souber que o remédio ingerido é inócuo (apesar de efeitos não-específicos ainda poderem atuar). Mas se o placebo for acompanhado de uma teoria detalhada e convincente, e o tratamento envolver cuidado e atenção por parte do naturologista, a probabilidade de sucesso da terapia aumenta. A naturologia pode assim ser sustentada por argumentos científicos aceitáveis, baseados na realidade e força do efeito placebo, como um complemento ou alternativa para uma classe restrita de problemas de saúde física ou mental.

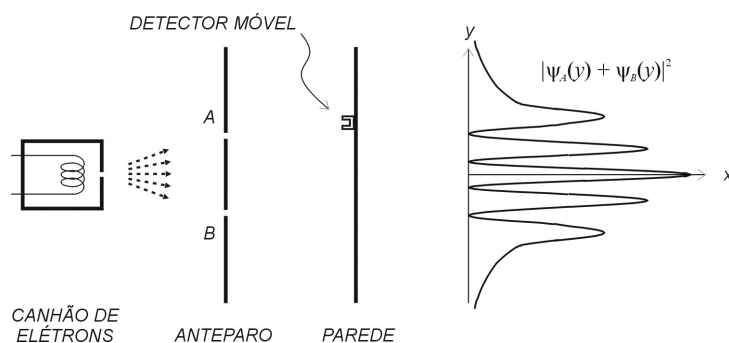
20. Observando Trajetórias

No texto “Interpretando o Experimento da Dupla Fenda”, estudamos um experimento em que o objeto quântico (elétron, luz, ou um átomo) tem à sua disposição dois caminhos possíveis, e no final (após a passagem de milhares desses objetos) aparecem franjas de interferência, típicas de ondas.



No texto “O Primeiro Debate Einstein-Bohr”, vimos a tentativa de Einstein de descobrir por qual fenda passa o objeto, e como Bohr argumentou convincentemente que se medirmos a trajetória do objeto, as franjas de interferência desaparecem. Com isso, formulou seu princípio de complementaridade (ou dualidade onda-partícula): para entendermos um experimento quântico, utilizamos ou um quadro ondulatório (que explica as franjas), ou um quadro corpuscular (no qual se pode dizer por qual caminho a partícula rumou ao longo do experimento), mas nunca ambos ao mesmo tempo (ou seja: se tem franja, não tem trajetória, e vice-versa).

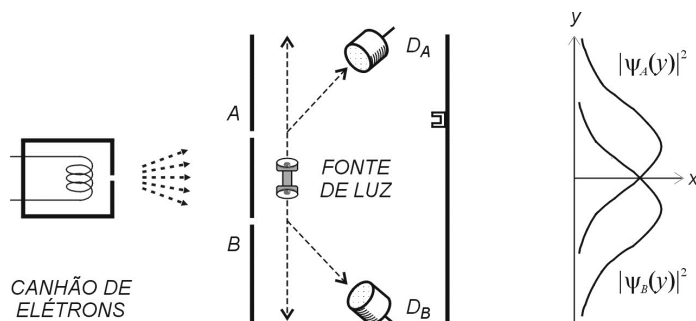
Esta discussão foi retomada, na década de 1960, por Richard Feynman. Ele examinou o experimento da fenda dupla para elétrons, que tinha sido realizado em 1961 pelo alemão Claus Jönsson. Esquemáticamente, podemos representar este experimento da seguinte maneira:



Os elétrons são emitidos por um fio aquecido, e podem passar pela fenda A ou B. Um detector móvel vai registrando quantos elétrons caem em cada região de uma parede, e ao final obtém-se um gráfico de intensidade (eixo x) versus a posição y na parede. Esse gráfico mostra que há

regiões em que incidem muitos elétrons, e regiões em que não incide nenhum elétron: justamente as “franjas de interferência” mencionadas anteriormente.

Feynman então imaginou que se tentasse medir o caminho escolhido por cada elétron. Para isso, imaginou duas pequenas lanternas (fontes de luz), colocadas atrás do anteparo com as fendas, que emitiriam fótons de luz. Numa situação idealizada, se o elétron passasse pela fenda A, ele desviaria um fóton para o detector D_A (situação análoga ocorreria se o elétron passasse pela fenda B).



Obteríamos, assim, informação da trajetória do elétron. Porém, ao final do experimento (repetido para milhares de elétrons), as franjas de interferência desapareceriam! O que se obteriam seriam duas regiões de incidência de elétrons, uma defronte à fenda A e outra defronte a B, que se somariam, resultando numa mancha clara única, sem a oscilação entre claro e escuro do experimento anterior (sem franjas de interferência). Segundo Feynman, isso seria semelhante ao que se obteria se balas de revólver fossem atiradas através das fendas: um comportamento típico de partículas indivisíveis.

Por que os elétrons mudam de comportamento de uma situação para a outra? É só porque o cientista escolheu *observar* sua trajetória? A resposta é sim, mas percebemos que esta observação mexe no elétron, provoca um distúrbio no elétron. Para observar o elétron passando pela fenda A ou B é preciso “bater” nele com um fóton, e isso altera o seu estado.

Com a fonte de luz desligada, o elétron passeia bucolicamente como uma onda, sem que nada perturbe seu estado onírico. Quando a fonte é ligada, aparece um monte de fótons batendo em sua cabeça, forçando-o a acordar, a tomar uma decisão sobre qual fenda ele escolheu! E isso acontece quer os detectores D_A e D_B estejam presentes, quer não.

Esse exemplo mostra, mais uma vez, que uma “observação” na física quântica não é algo distante, que não perturba o objeto, como se estivéssemos olhando através de um binóculo para um lance de futebol. A observação quântica “sacode” o objeto microscópico e extrai à força as informações dele. Não é de se espantar que a medição da trajetória do elétron cause uma mudança tão grande em seu comportamento.

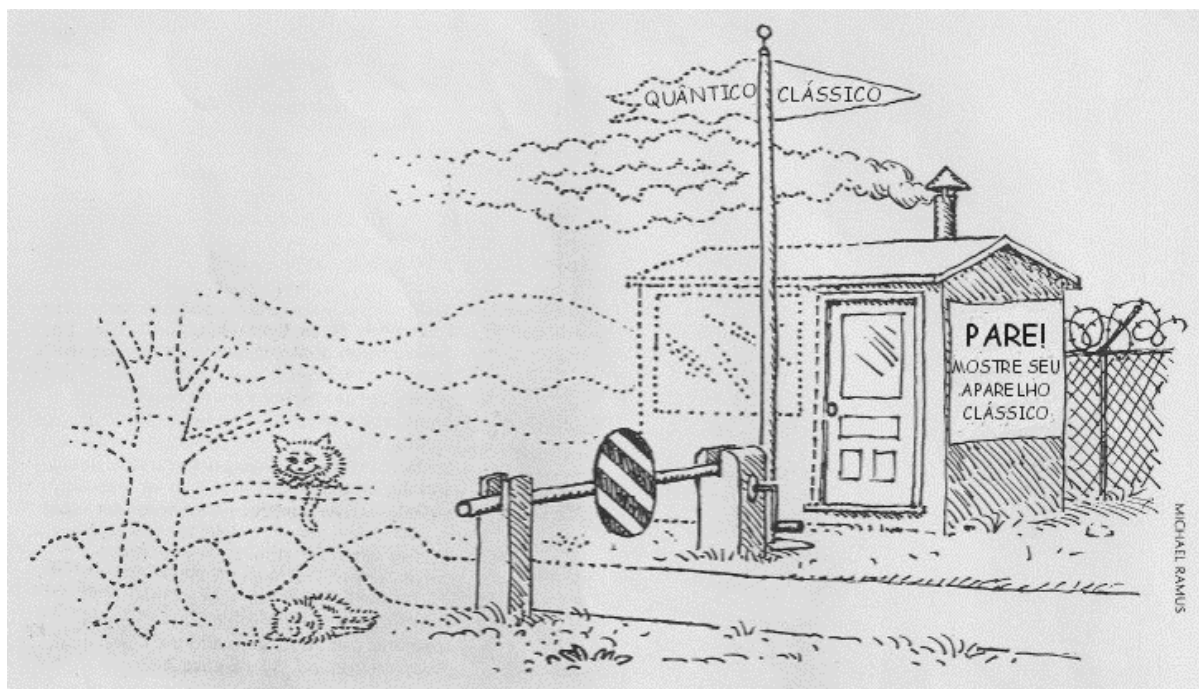
Uma última questão deve ser mencionada. No fenômeno ondulatório, com franjas de interferência, não se pode dizer que “o elétron rumou *ou* por A, *ou* por B, só que nós *não sabemos* por onde ele passou”? É possível responder esta questão de maneiras diferentes, conforme a interpretação adotada. Mas uma resposta simples e básica é dizer que *não*! No

fenômeno ondulatório, o elétron *não* rumou por uma fenda bem definida, mas sim *pelas duas* ao mesmo tempo, como faria uma onda clássica. É como se ele estivesse placidamente imbuído de uma *simetria*, mas quando alguém interage com ele, para observar sua posição, esta simetria seria “quebrada”.

21. A Fronteira entre o Quântico e o Clássico

“Ora, se nós somos feitos de átomos, e os átomos têm comportamento quântico, nós também somos quânticos! Se átomos podem estar em dois lugares ao mesmo tempo, nós também podemos! Se os cientistas provaram que há computação quântica para sete átomos, então nosso cérebro é um computador quântico! Se dois átomos distantes podem ficar em sincronia, duas pessoas também podem! A consciência cósmica deve estar baseada nesse emaranhamento de partículas quânticas!”

Concepções como essas são comuns hoje em dia, mas elas não levam em consideração uma questão que ainda hoje não é perfeitamente compreendida pela ciência: a fronteira entre o mundo quântico e o mundo clássico. A figura abaixo, feita por Michael Ramus, apareceu em um artigo de W.H. Zurek, na revista *Physics Today* de outubro de 1991. Do lado direito, está o país clássico, aquele que nós conhecemos, onde uma cerca permanece parada em um único lugar, e os caminhos no chão são bem definidos. À esquerda, o país quântico, que é difícil de representar de maneira pictórica. Ali, tudo aparece em forma de pontinhos, vemos o caminho no chão oscilando como uma onda, e vemos um gato que está numa superposição de vivo e morto. Para atravessar a fronteira, o habitante do mundo clássico precisa utilizar um aparelho de medição, única via de acesso para o mundo quântico!



Nas décadas de 1980 e 90, avançou-se bastante na compreensão desta fronteira entre o clássico e o quântico, por meio da noção de “decoerência (ou descoerência) induzida pelo ambiente”. Houve inclusive um brasileiro envolvido nesses avanços teóricos, o Amir Caldeira, da Unicamp. Para descrever mais o menos o que diz essa teoria, farei uso de uma alegoria com átomos.

Um certo átomo, chamemo-lo de Amir, vive isolado em sua casa, sem ser incomodado por ninguém. Nessas condições, ele se comporta como uma onda, se espalhando pela espaço disponível, sempre pulsando (como faz toda matéria), ficando em um estado simétrico, sem se localizar em um ponto específico, sem que a passagem do tempo seja sentida, etc. Entra em sua região um outro átomo, Bibi, e pode haver uma atração mútua, e eles se emaranham, abraçam, perdem a identidade, entram em outro estado simétrico, pulsam juntos e o tempo não passa. Se acontecesse de Bibi cair em um buraco e se separar espacialmente de Amir, mesmo assim poderiam continuar unidos no mesmo estado simétrico de perfeita comunhão, sem que a distância destruísse sua união!

Amir e Bibi moram juntos, isolados do mundo externo, mas este isolamento nunca é completo. O próprio chão de sua casa pulsa e flutua, e ocasionalmente aparecem partículas que interrompem o que eles estavam fazendo, ou então entra um “gráviton” pela janela, ou algum “fóton” oriundo do big bang. Mas essa interação com o ambiente raramente altera a rotina, e os físicos quânticos que estão estudando este casal de átomos não têm problemas em descrevê-los através da teoria quântica. Esses cientistas exprimem isso, com seu linguajar difícil, mesmo que de maneira simplificada, da seguinte maneira: “Os níveis de energia disponíveis têm separação de muitos elétrons-volt, e as partículas externas não têm energia suficiente para provocar uma transição entre os níveis, com probabilidade apreciável”.

Amir e Bibi vivem felizes, alheios ao que pensam os cientistas, mas aí estes manipuladores de corpúsculos resolvem que os dois merecem ter uma família, e começam a adicionar um monte de outros átomos, Clara, Dodô, Elza, ... um para cada letra do alfabeto. Tal sistema poderia entrar no mesmo simétrico estado de nirvana de seus pais, mas acontece algo curioso. A presença de muitos átomos faz com que os tais níveis de energia entre eles se multipliquem, e a separação entre os níveis fica pequena. Agora, os fótons e grávitons que passam por eles têm energia para causar transições frequentes entre os tais níveis. Os habitantes dessa comunidade não conseguem mais se isolar da sociedade: o carro vendendo pamonha com alto-falante atíça o desejo das crianças, o outdoor luminoso mostrando átomos despidos bebendo cerveja invade a sala, e os átomos passam a ser parcialmente escravizados pela multidão de partículas que vivem do lado de fora. Se antes os átomos eram “delocalizados” (não ficavam numa posição definida), agora o ambiente impõe para eles posições rígidas, da mesma maneira que as carteiras de uma escola impõem aos alunos onde eles devem ficar.

Mas este processo de impor às crianças um comportamento rígido, em função de uma “base” escolhida pelo ambiente escolar (outra base poderia ser escolhida, se o ambiente fosse outro), só pode ser feito através de sucessivos empurrões nos miúdos átomos. É como se um exército de pequenos fotões e gravitões (para usar a nomenclatura de Portugal) ficassem continuamente empurrando os átomos, impedindo que eles dessem asas à imaginação, que eles se espalhassem pela sala de aula ou mantivessem suas interações emaranhadas com os outros átomos. Não! Agora cada átomo fica confinado, colapsando sucessivamente para a mesma posição por ordem dos fotões e gravitões, e as anteriormente ricas interações com seus colegas ficam borradas pela interação com os bilhões de átomos que vivem na sociedade, fora da escola, e que são os emissários do exército de pequenos empurradores.

Essa, então, é uma versão alegórica da estória que nos contam os físicos quânticos, para explicar o que é a “decoerência induzida pelo ambiente”. Os átomos estudantes, que antes viviam de maneira “coerente”, simétrica, harmoniosa, agora vivem sob constante perturbação e perdem a sintonia com os outros colegas (ou melhor, passam a ficar sintonizados com todos os átomos da sociedade). E este comportamento, após a decoerência, é justamente o comportamento das coisas no mundo clássico!

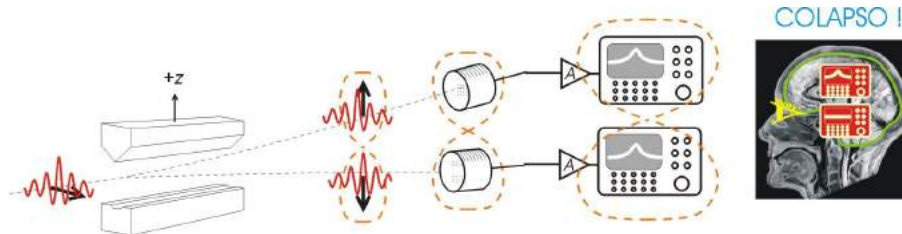
Há, porém, ainda um problema, que os físicos não conseguiram resolver de maneira consensual. A teoria explica bem qual é o ordenamento das carteiras nas quais os gurus atômicos têm que se sentar, mas ela não explica porque Clara se sentou em tal carteira e não em outra! Ou seja, a noção de decoerência fornece uma explicação estatística, mas não resolve o problema da medição (ou do colapso) para o caso de um átomo individual.

Assim, a noção de decoerência não resolve todos os problemas relacionados com a fronteira entre o quântico e o clássico, mas ela indica em que condições um fenômeno tipicamente quântico é borrado, e passa a se comportar classicamente. Nosso cérebro, que é relativamente quente (ou seja, cheio de flutuações térmicas que provocam decoerência), é um ambiente que dificilmente permitiria a manutenção de coerência quântica.

Os aspectos holistas do mundo quântico seduzem os místicos, que gostariam que esses aspectos fundassem cientificamente o holismo que envolveria as almas humanas. Mas, em primeiro lugar, a pretensa união entre as almas ou a ligação entre as partes do cérebro poderia muito bem ser compreendida dentro do mundo clássico, onde há um limite para a velocidade de propagação de informação. Em segundo lugar, o grande mistério da consciência é a explicação científica das *qualidades* que vivenciamos subjetivamente na percepção, na memória, no sentimento, na emoção, na compreensão. Se algum dia houver uma teoria científica das *qualidades* mentais, ela terá que envolver menção a essas qualidades. A teoria quântica não faz isso! A teoria quântica descreve átomos mais ou menos bem isolados. O mistério científico da consciência deve ser de outra ordem, envolvendo talvez princípios ainda desconhecidos que se tornem importantes na escala das grandes moléculas. Tais princípios deverão ser consistentes com a física quântica, mas a chave científica do mistério da consciência não pode estar em noções como colapso ou emaranhamento, que são princípios *quantitativos*, e não envolvem qualidades.

22. As Interpretações dos Muitos Mundos

No texto “O Problema da Medição”, discutimos a questão, colocada por algumas interpretações realistas ondulatórias, sobre qual seria a etapa do processo de medição em que ocorreria o colapso da onda quântica. Seria na interação do objeto quântico com a placa metálica do detector? Seria no processo de amplificação, que envolve o fornecimento externo de energia? Seria quando um registro macroscópico fosse obtido? Ou seria quando um ser humano consciente observasse o resultado macroscópico do experimento?

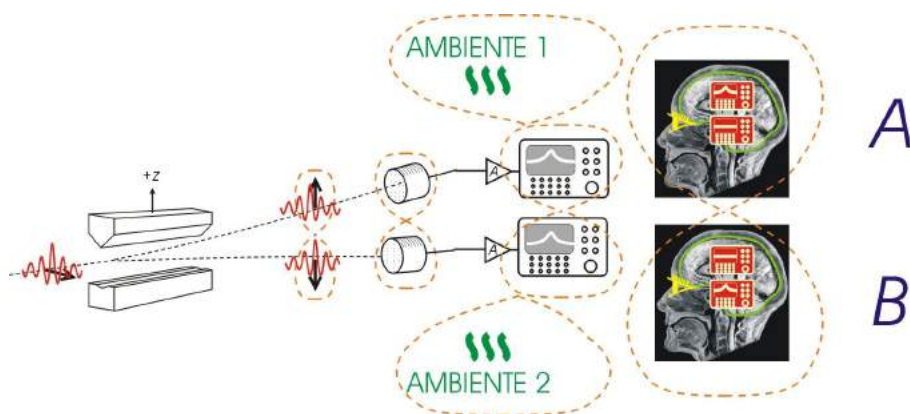


A tese de que é o ser consciente que provoca o colapso é conhecida como interpretação subjetivista, e foi explorada no texto “A Consciência Legisladora”. Na figura acima, representamos um átomo como um pacote de onda vermelho (com uma flecha), que após passar pelo ímã de um aparelho de Stern-Gerlach entra em uma superposição, indicada por linhas tracejadas alaranjadas. A interpretação subjetivista supõe que a superposição dos átomos “contamina” os aparelhos macroscópicos, de tal forma que estes também entram em uma superposição, de maneira semelhante ao que foi visto no texto “Onde está o Gato de Schrödinger?”. Mas quando, finalmente, um ser humano observa o aparelho, a sua consciência teria o poder de provocar o colapso, e apenas uma das potencialidades se atualiza (ver imagem no cérebro do observador da figura).

Essa interpretação subjetivista não é bem vista pela maioria dos físicos, apesar de ter sido bastante difundida nas últimas décadas pelo movimento que podemos chamar “misticismo quântico”. Esta visão não é refutada por nenhum experimento factível, de forma que ela é uma interpretação tão digna quanto as dezenas de outras.

No entanto, é curioso que muitos físicos ortodoxos passaram a defender uma visão ainda mais exótica, na qual o próprio observador humano entra numa superposição quântica! Esta concepção é conhecida como a *interpretação dos muitos mundos*.

Esta visão foi apresentada pela primeira vez em 1957, pelo norte-americano Hugh Everett III, que fazia seu doutorado sob a orientação de John Wheeler, que mencionamos no texto “A Escolha Demorada”. Segundo este ponto de vista, nunca ocorrem colapsos. Um observador humano, ao olhar para o resultado do experimento, entraria numa superposição quântica, e haveria então duas versões do observador, dois “ramos”, cada qual tendo percebido um resultado diferente para o experimento. Cada ramo corresponderia assim a um resultado da medição quântica, e a memória do ser humano, em cada ramo, não teria acesso à memória do outro ramo. Assim, em cada ramo, o ser humano teria a ilusão de que apenas *um* resultado de medição se produziu, e diria que tal resultado surgiu após uma “redução” ou colapso do estado quântico. Mas, na verdade, ele teria entrado numa superposição macroscópica, e nenhuma redução de fato teria ocorrido: esta seria apenas uma aparência.



Na figura, representam-se as duas versões do observador, *A* e *B*, unidos porém como uma superposição quântica. Apesar de eles estarem unidos, como irmãos siameses, um não percebe a presença do outro. O observador *A* registrou um certo resultado em seu cérebro, e toda vez que ele se lembrar desta observação, ele só terá acesso à memória em sua cabeça, nunca na cabeça do outro. Assim, eles não têm como saber que o outro existe!

O interesse de Everett era tratar o Universo todo como um sistema quântico, e como não haveria um observador externo, achou por bem supor que colapsos nunca ocorrem (pois eles só poderiam ser provocados por um observador externo). Notamos, na figura, que representamos o emaranhamento do sistema quântico com o ambiente externo. Isso, para as visões subjetivista e dos muitos mundos, não é suficiente para provocar colapso.

Tanto a interpretação subjetivista quanto a dos muitos mundos são atraentes para as visões místicas, mas deu para perceber que elas são interpretações conflitantes, ou seja, não dá para defender ambas as interpretações ao mesmo tempo. Na visão subjetivista, a consciência tem um certo poder sobre a realidade, o que não ocorre na visão dos muitos mundos. Nesta, porém, há uma sugestão de que podemos ter vidas paralelas, ou que nossas diferentes potencialidades na vida de fato coexistem, o que também é atraente para a visão de mundo mística.

Everett chamou sua visão de interpretação dos “estados relativos”, pois o estado de um observador (por exemplo) é definido em relação ao estado do sistema que ele observa. Em 1973, uma versão um pouco diferente, chamada interpretação dos “muitos mundos”, foi divulgada por Bryce DeWitt, que considerou que os diferentes ramos (como *A* e *B*) seriam na verdade diferentes mundos, ou Universos paralelos. A diferença entre a visão de Everett e a de DeWitt é que, para o primeiro, haveria apenas um único Universo, de comportamento completamente quântico, ao passo que o segundo imaginava cada ramo como um Universo clássico diferente.

Dois historiadores brasileiros, Olival Freire Jr. e Fábio Freitas, da Universidade Federal da Bahia, têm estudado cartas e documentos relativos a Hugh Everett, mostrando as dificuldades que ele teve para divulgar suas idéias para a comunidade dos físicos, em especial para Niels Bohr.

O interesse recente que os físicos têm tido pelas idéias de Everett pode ser exemplificado pela capa da revista *Nature*, mostrada abaixo, que apresenta uma ilustração típica de livros de ficção científica.



23. A Interpretação da Onda Piloto

O francês Louis de Broglie havia se formado em História, mas influenciado por seu irmão, Maurice, que era um físico experimental, acabou fazendo seu doutorado em física, e foi então que lançou, a partir de 1923, uma idéia revolucionária, que lhe daria o prêmio Nobel: toda matéria, que consiste de partículas, também é onda, oscilando numa frequência bem determinada.

Essa idéia foi levada adiante por Erwin Schrödinger, que em 1926 elaborou sua Mecânica Ondulatória, que concebia que toda a matéria é apenas onda, representada pela letra grega Ψ . A teoria de Schrödinger foi uma das primeiras versões do que viria a ser chamado Mecânica Quântica. Ponderando sobre a teoria deste físico austríaco, de Broglie decidiu manter sua idéia dualista de que a matéria consiste simultaneamente de onda *e* partícula, e em 1927 anunciou sua interpretação realista: “Concebe-se agora a onda contínua como guiando o movimento da partícula. Trata-se de uma onda piloto.”

Em termos matemáticos, o procedimento de de Broglie era simples: ele pegava a função de onda Ψ de Schrödinger, e a separava como o produto de dois componentes, R e e^{iS} . Substituindo este produto na equação de onda de Schrödinger, de Broglie pôde separar uma equação para a “onda vazia” (às vezes chamada “potencial quântico”) e outra para o “corpúsculo” (ou seja, a partícula). A onda é considerada “vazia” porque ela não conteria nem matéria, nem energia, nem carga elétrica. Ela seria apenas uma “onda de informação” (como se diria na década de 50) que *guiaria* o corpúsculo em sua trajetória contínua pelo espaço. Além de guiar o corpúsculo, a expressão matemática da onda vazia, quando elevada ao quadrado, também fornece a *probabilidade* de se encontrar a partícula em um dado ponto. Essa probabilidade que atribuímos à localização do corpúsculo exprimiria nossa *ignorância* a

respeito de onde realmente está o corpúsculo (ou seja, não seria uma probabilidade intrínseca à natureza, como em outras interpretações).

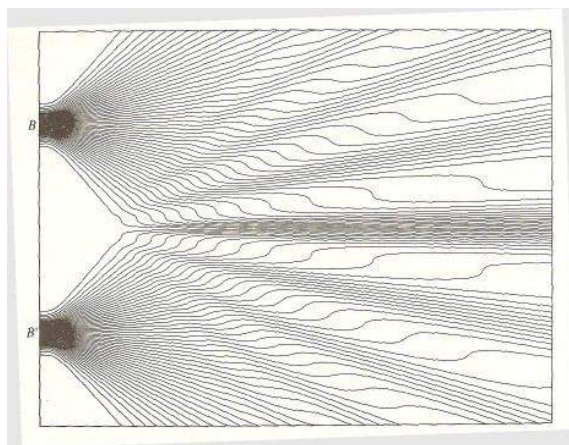


Figura 1: Trajetórias possíveis de um único elétron no experimento da fenda dupla (Holland, p. 184). Cada corpúsculo pode ser imaginado como um “surfista”, e o que determina sua trajetória é a conformação das ondas vazias (não desenhadas na figura) em cada ponto. Note que as linhas nunca se cruzam. Nas regiões mais claras, os corpúsculos se moveriam a uma velocidade maior do que a da luz. À direita podem-se perceber as franjas de interferência (claro e escuro).

A interpretação de Louis de Broglie tinha o grande mérito de permitir a “visualização” do átomo e dos elétrons. É por causa desta visualização que sua teoria é dita “realista”, pois ela descreve uma realidade que estaria por trás das observações, e que existiria independentemente do ser humano, a cada instante (e não só no instante da observação).

No entanto, no Congresso de Solvay de 1927, que descrevemos no texto “O Primeiro Debate Einstein-Bohr” (onde apresentamos uma foto dos cientistas reunidos), o físico austríaco Wolfgang Pauli apresentou uma série de objeções a de Broglie, e este acabou abandonando sua interpretação dualista realista. Com isso, a interpretação da complementaridade de Niels Bohr se tornou hegemônica.

Em 1951, um físico norte-americano chamado David Bohm publicou um livro bastante didático, em que tentava apresentar a visão da complementaridade de Bohr de maneira mais visualizável. Sua tentativa não foi muito bem sucedida, mas isso o levou, em 1952, a redescobrir a interpretação abandonada por Louis de Broglie um quarto de século antes. Ao ser informado das objeções de Pauli, Bohm conseguiu resolvê-las – juntamente com outro problema levantado pelo matemático John von Neumann – introduzindo em sua descrição não só as variáveis ocultas do objeto quântico (ou seja, posição e velocidade dos corpúsculos), mas também as variáveis ocultas do próprio aparelho de medição.

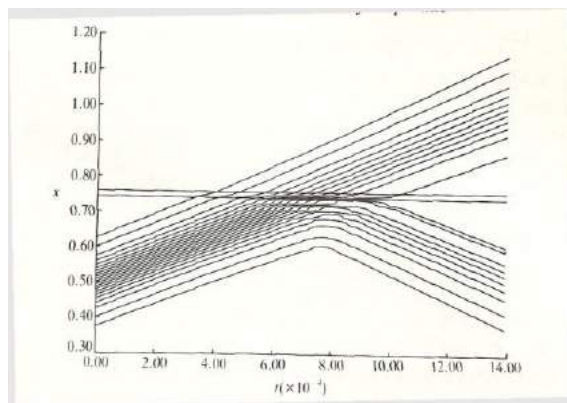


Figura 2: Movimentos possíveis para a reflexão parcial de uma partícula em uma barreira (Holland, p. 207). O que determina se um corpúsculo atravessa a barreira ou não é sua posição inicial no eixo x . O gráfico é de posição x versus o tempo t .

Este artigo de David Bohm pode ser considerado o mais importante trabalho na filosofia da física quântica desde o nascimento da teoria. Ele mostrou que é possível interpretar a teoria quântica de maneira diferente da visão ortodoxa, de tal forma que todos os eventos são completamente determinados por causas (ou seja, é uma teoria estritamente determinista). Após este trabalho, Louis de Broglie voltou novamente a defender suas velhas idéias sobre a onda piloto.

Nessa época, Bohm era simpatizante do Partido Comunista, e foi perseguido pelo macartismo, sendo obrigado a sair de seu país. Acabou vindo morar em São Paulo, onde trabalhou na USP durante quatro anos. No começo da década de 60, perdeu o interesse em sua teoria causal de 1952, voltando-se para uma nova abordagem holística que chamou de “ordem implícita”.

O historiador brasileiro Olival Freire Jr. concluiu que uma das razões principais do pouco interesse despertado pela teoria de Bohm foram as dificuldades de estender seus resultados para o domínio de altas velocidades, onde se aplica a teoria da relatividade. Mas juntamente com esse fator “interno” à ciência, houve também toda uma mistura das discussões sobre as interpretações da teoria quântica com questões políticas, ligadas à Guerra Fria.

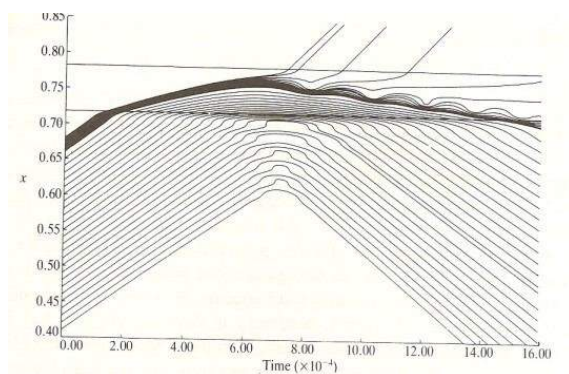


Figura 3: Movimentos possíveis para a reflexão de uma partícula em uma barreira. Nota-se que há a possibilidade de passagem, devido ao efeito de “tunelamento” (Holland, p. 200).

Nos anos 80, houve um renascimento das idéias de Bohm e de Broglie, devido principalmente à geração em computadores de figuras que traçavam as possíveis trajetórias dos corpúsculos. São essas figuras que ilustram o presente texto, tiradas do mais completo livro sobre a interpretação de de Broglie-Bohm, *The Quantum Theory of Motion*, de Peter Holland (Cambridge U. Press, 1993).

Para finalizar esta história, deve-se mencionar que nos anos 90 desenvolveu-se uma abordagem conhecida como “mecânica bohmiana”, que deixou de atribuir realidade física à onda piloto, mas que manteve a fórmula de guiamento das partículas, introduzida por de Broglie. Uma das realizações desta nova abordagem foi tratar o caso relativístico, obtendo porém equações bastante complicadas.

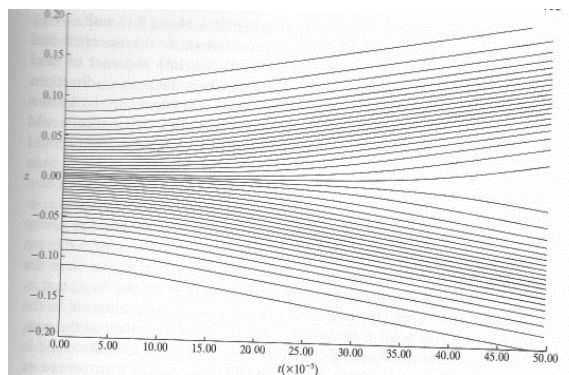


Figura 4: Movimento de átomos no experimento de Stern-Gerlach (Holland, p. 415). O gráfico é de posição z versus o tempo t . As diferenças nas posições iniciais seriam muito pequenas para serem determinadas pelo físico experimental. Assim, devido a sua ignorância, o cientista não consegue prever se o átomo irá para cima ou para baixo.

Existem de fato as trajetórias desenhadas nas figuras? Essa é uma questão de “interpretação”: não há como comprovar sua existência, pois tais trajetórias existiriam antes de o objeto quântico ser observado (ou seja, antes de interagir com o aparelho de medição).

A interpretação da onda piloto não tem sido usada nas abordagens mais místicas à física quântica. Isso porque o retrato que ela elabora para a realidade é muito próximo da física clássica (que tenta explicar tudo por meio de bolinhas e forças). Porém, há um elemento novo em relação à física clássica, que Bohm salientou com clareza. As forças envolvidas nessa interpretação (ou seja, o potencial quântico) são “não-locais”. Conforme vimos no texto “Teorema de Bell para Crianças”, foi essa a idéia que John Bell generalizou e transformou na maior questão filosófica do mundo quântico.

24. Individualidade de Partículas Quânticas

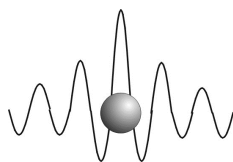
No texto “Partículas e o povo de Tlön”, representamos um objeto quântico (como um próton) por meio de uma bolinha individualizada, a que demos o nome “Fi”:



Uma maneira alternativa de representar um objeto quântico localizado é por meio de uma onda bem comprimidinha, chamada “pacote de onda”, ou *pulso* de onda:

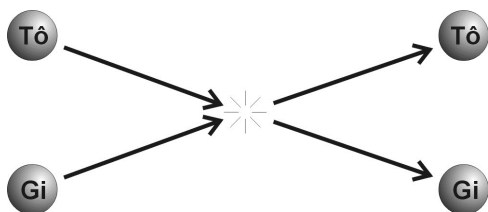


Há também uma terceira concepção sobre o que o objeto quântico é, na realidade, e esta concepção é a dualista:

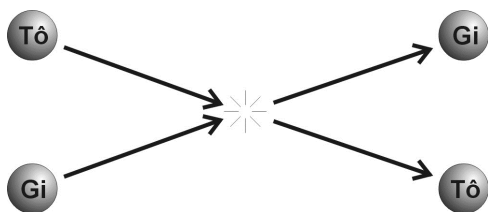


Apesar de estas concepções serem diferentes, cada uma dessas interpretações explica, a seu modo, os fenômenos observados no laboratório.

A questão agora é o que acontece quando *dois* objetos quânticos se encontram? Suponha que tenhamos dois prótons, a que damos os nomes “Tô” e “Gi”. Se eles sofrerem uma colisão, como duas bolas de bilhar, esperamos que eles se ricocheteiem:

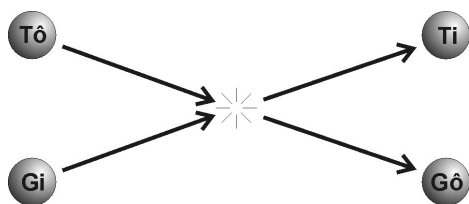


Porém, se imaginamos que esses objetos quânticos são como ondas, que podem se cruzar sem que um afete o outro, vislumbramos uma outra possibilidade:



Qual das duas situações ocorre, de fato, em um experimento de colisão de prótons?

Segundo o *princípio quântico de superposição*, se há dois estados possíveis para um sistema (como as duas figuras acima), então sua “superposição” também é um estado possível. E, de fato, a melhor representação para o que acontece quando Tô e Gi se encontram é tal superposição. A consequência disso é que Tô e Gi perdem sua individualidade, e as partículas resultantes terão que receber nomes que misturem as características das partículas iniciais, como por exemplo “Ti” e “Gô”:



Tentemos esclarecer essa situação. Se, após a colisão, encontramos a partícula de cima (Ti), não temos como saber se ela veio de cima (Tô) ou de baixo (Gi). Mas a questão não é apenas que nós *ignoramos* qual é a realidade; de fato, somos obrigados a dizer que a própria *realidade* de Ti proveio de uma composição das realidades de Tô e de Gi. É assim que a

maioria das interpretações da teoria quântica analisa a situação, quando se busca explicar resultados de experimentos semelhantes a esse.

Em termos filosóficos, diz-se que Tô e Gi perdem sua *individualidade*, aquilo que os torna indivíduos. Melhor seria dizer que eles misturam ou combinam suas individualidades. Se fôssemos fazer uma analogia com seres humanos, é como se um homem e uma mulher se abraçassem e, ao se separarem, não existissem mais as duas pessoas originais, mas um casal de filhos dos dois (com o material genético misturado). Seria um “abraço quântico”!

Essa analogia com humanos, porém, não pode ser estendida muito além, pois há um detalhe que é essencial para o caso das partículas: elas precisam ser *indistinguíveis*. Isso significa que todas as propriedades intrínsecas de uma partícula são iguais às da outra. Assim, Tô e Gi têm a mesma massa, a mesma carga elétrica, o mesmo estado de spin, etc. Ou seja, não se pode distinguir Tô e Gi fazendo-se medições de suas propriedades intrínsecas. O que distingue as duas partículas, inicialmente, é sua localização espacial, que é uma propriedade extrínseca (que depende da relação do objeto com seu meio). Mas quando elas se encontram, na colisão, até mesmo essa propriedade extrínseca passa a ter valor igual para os dois objetos. Nessa situação de indistinguibilidade intrínseca e extrínseca, ocorre perda de individualidade.

Esse fenômeno ocorre não só para duas partículas elementares, mas também para dois átomos ou duas moléculas, desde que sejam indistinguíveis (ou seja, desde que não envolvam isótopos diferentes).

É comum, nas discussões sobre esse assunto, dizer que dois prótons são “idênticos”, mas este termo é ambíguo (tem diferentes significados), e prefiro não utilizá-lo. Segundo o uso corrente na filosofia, dizer que dois prótons são “idênticos” seria dizer que eles são um único indivíduo. Por exemplo, posso dizer que a estrela-d’alva e a estrela vespertina são idênticas, pois correspondem ao aparecimento de um indivíduo único, Vênus, de manhã e de tarde.

O tema tratado neste texto é um dos mais enrolados da filosofia da física quântica! Há também uma conexão importante com as chamadas “estatísticas quânticas”, conforme interpretadas pelo físico inglês Paul Dirac, em 1926, mas não entraremos aqui neste assunto.

Alguns autores consideram que mesmo partículas separadas espacialmente, como Tô e Gi, carecem de individualidade própria. Esta é a posição defendida pelos lógicos brasileiros Newton da Costa e Décio Krause, que desenvolveram um novo tipo de teoria dos conjuntos, onde os elementos não têm individualidade.

25. É Possível Ver um Átomo?

No texto “Partículas e o Povo de Tlön”, mencionei que hoje em dia há microscópios que permitem observar átomos. Apresentei o que chamei de a primeira “foto” de um átomo, obtida em 1955. A estudante de química Larissa Ferreira protestou, pois falar em “foto” sugere que a imagem foi obtida por meio de luz visível focada com uma lente óptica. Aceitei sua objeção (não se deve brigar por causa da definição de uma palavra), e perguntei se ela aceitaria dizer que “observamos” o átomo.

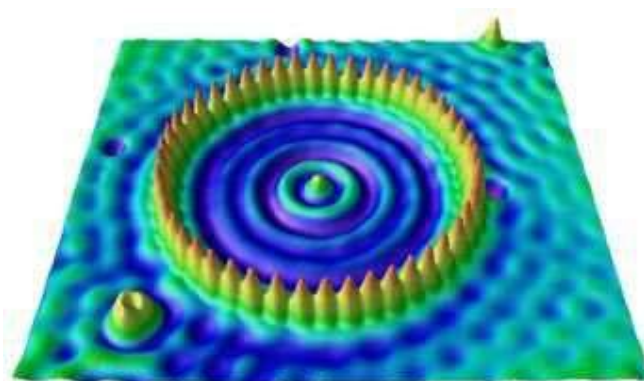
Na verdade, podemos dizer que “vemos” átomos a todo momento, pois todas as coisas são feitas de átomos. Mas será que podemos ver um átomo individual? A resposta é sim, mesmo sem um instrumento. Em 1990, o físico Hans Dehmelt estudava um dispositivo chamado

“armadilha magnética”, e conseguiu isolar um único íon de bário nessa armadilha (um íon é um átomo que tem elétrons a mais ou a menos, de forma que tem uma carga elétrica, o que é necessário para permanecer na armadilha). Ele até deu um nome ao íon, Astrid, e tirou uma foto! Para fazer isso, iluminou Astrid com uma luz azul, e ela absorvia a luz e rapidamente a emitia, de forma que se via um pontinho azul no meio da aparelhagem. A figura abaixo é um photoshop da imagem publicada por Dehmelt, que por sinal ganhou um Prêmio Nobel por suas armadilhas.



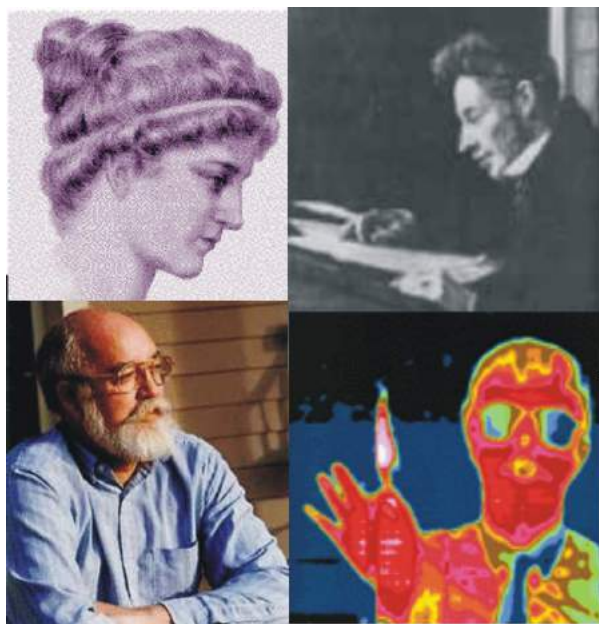
Podemos dizer que este ponto azul corresponde a milhões de fótons emitidos pelo átomo em um segundo, por isso ele é visível.

Mas será que podemos observar um átomo mais de perto, ver o ambiente nanoscópico que o cerca? Como mencionado acima, hoje em dia há dezenas de tipos diferentes de microscópios que são sensíveis a detalhes atômicos. Vejamos uma imagem obtida por um deles, na IBM (disponibilizada pela Almaden Research Center, Califórnia):



O “curral” consiste de 48 átomos de ferro adsorvidos numa superfície de cobre. Cada átomo de ferro aparece de forma pontiaguda, o que é um efeito de como a ponta do microscópio interage com os átomos. As cores são “falsas”. Dentro do curral, vemos ondas estacionárias formadas pelos elétrons da superfície do cobre. Esta imagem exhibe de maneira notável o caráter ondulatório dos elétrons. O curral redondinho foi fabricado por meio de técnicas da nanotecnologia. Notamos na imagem duas “ilhotas” do lado de fora do curral, que são defeitos da superfície do cobre.

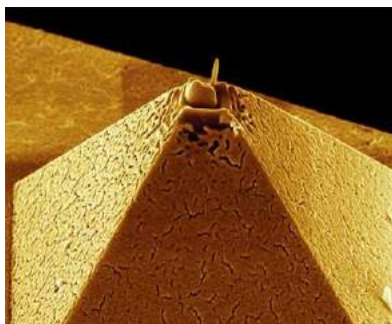
Em que sentido isso é uma “observação” de um sistema de átomos? Para examinar essa questão, analisemos algumas imagens mais usuais:



A foto embaixo, à esquerda, é do filósofo norte-americano Daniel Dennett. Ela se aproxima muito da maneira pela qual veríamos Dennett, se estivéssemos diante dele no dia em que a foto foi tirada. Podemos considerar esta imagem como sendo análoga a uma *observação*. Já a imagem em cima, à esquerda, é da filósofa Hipatia, de Alexandria. A pessoa que a desenhou não conheceu Hipatia, assim podemos considerar que esta imagem não é oriunda de observação, mas é uma *representação* fictícia, que procura representar algumas considerações teóricas que temos a respeito de Hipatia. Em cima, à direita, temos uma fotografia em preto e branco do filósofo dinamarquês Søren Kierkegaard. Esta imagem é análoga a uma observação, só que ela não tem cores. E a imagem embaixo, à direita? É uma foto obtida com uma câmera sensível ao infravermelho: regiões quentíssimas aparecem em branco, regiões quentes em vermelho, e regiões mais frias em azul. Pergunta: esta imagem está mais próxima de uma observação ou de uma representação fictícia? Eu diria que de uma observação. Mas e as cores falsas, elas não são fictícias? Sim, mas as cores “reais” que observamos também são uma criação de nossa mente, elas não existem “lá fora”, no mundo!

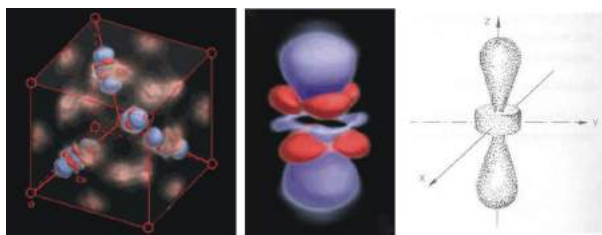
Voltemos agora à imagem do curral quântico: há cores falsas e há distorções de forma, mas ela captura a posição real dos átomos, e exhibe defeitos que estavam realmente lá. É possível que tenha havido tratamento da imagem, para suavizá-la e retirar eventuais ruídos advindos das imperfeições do microscópio. Mas afora esse tratamento, eu diria que se trata de uma observação de átomos, mediada por instrumentos.

Vale a pena mostrar uma imagem da ponta de um microscópio usado nesses processos de medição (as cores são falsas, como sempre; obtido do site http://www.nanowerk.com/spotlight/id1456_2.jpg):



A pontinha minúscula é sensível à presença de átomos individuais. A detecção pode ocorrer devido à passagem de elétrons para a ponta (microscópio de tunelamento) ou devido a um deslocamento da ponta por causa da atração entre a ponta e um átomo (microscópio de força atômica).

Será possível observar o interior de um átomo? Um grupo de químicos (Zuo et al., 1999) obteve a seguinte imagem para os estados dos elétrons no interior de um átomo de cobre:



A figura da direita é a que aparece em livros didáticos de química, para representar um estado do elétron no átomo de hidrogênio. Esse estado é conhecido como “orbital $3d_{x^2}$ ”. A imagem do meio (fonte: Arizona State University, Tempe) exprime a densidade de elétrons em torno de um átomo de cobre, onde o azul representa uma densidade menor do que a usual, e o vermelho uma densidade maior. A imagem da esquerda representa os átomos de cobre em um cristal de cuprita (Cu_2O).

As imagens da densidade eletrônica são reconstruções em 3-dimensões dos dados obtidos pelos autores, combinando difração de raios X e de um feixe convergente de elétrons. Novamente, temos uma combinação de observação e reconstrução baseada em considerações teóricas. A semelhança entre tais imagens e as figuras de orbitais (como o desenho da direita) gerou bastante debate entre os pesquisadores em ensino de química, mas não entraremos aqui nessa controvérsia.

Em suma, parece que é possível “observar” átomos, com a mediação de instrumentos e incorporando suposições teóricas no tratamento dos dados. Espero que Larissa concorde com isso!

26. Astrobigoaldo quer Informação Instantânea

O viajante interplanetário Astrobigoaldo passava o feriado nas praias de metano de Titã, a lua de Saturno, mas estava ansioso por causa da final da Copa do Mundo. Com seu radinho de pilha ele conseguia ouvir a transmissão da Terra, mas demorava 70 minutos para o sinal chegar em Titã. Resolveu então tentar usar a famosa “não-localidade quântica” para receber a informação instantaneamente!

Instruiu seu fiel companheiro Isqüertibeleléu para pousar em Ganimedes, a maior lua de Júpiter, que na época estava a meio caminho entre Titã e a Terra. Isqüerti levava consigo um gerador de partículas emaranhadas, que são aquelas partículas quânticas que mantêm uma espécie de unidade, mesmo quando separadas à distância. Fazendo uso dessa “não-localidade quântica” (ver o texto Teorema de Bell para Crianças”), Astrobigo tinha esperança de ficar sabendo do resultado da partida de futebol logo após seu encerramento. Na Terra, combinou com Bibocabibes, seu oásis de alegria humana, como ela deveria proceder para lhe transmitir a informação.

Antes de explicar o seu método, precisamos rever algumas noções de física quântica. Dentre as várias propriedades das partículas, está seu “spin” (que pode ser pensando como a direção e sentido de um ímã). Quando esta propriedade é medida, geralmente obtém-se um dentre dois valores, $+1/2$ ou $-1/2$ (correspondente ao Norte e ao Sul do ímã; ver o texto “Onde está o Átomo de Prata?”). Se a partícula for preparada no estado N, o valor medido é sempre $+1/2$, e se for preparada em S, o valor é $-1/2$.

Na física quântica, porém, sabemos que a partícula pode ser preparada numa superposição de N e S. Desprezando constantes numéricas (coeficientes de normalização), podemos representar esse estado por: $N + S$. Neste caso, qual será o resultado da medição de spin? Os valores possíveis continuam os mesmos ($+1/2$ ou $-1/2$), mas agora cada um tem probabilidade de 50% de ocorrer. Há, na verdade, uma simetria nessa situação. O estado superposto $N+S$ pode ser pensado como um ímã apontando para oeste O, ao passo que o estado ortogonal a ele seria leste: $L = N-S$. Se o aparelho de medição for girado em 90° , e o estado inicial da partícula for $O = N+S$, então o resultado da medição dará com certeza o resultado $+1/2$.

Vamos supor que as partículas geradas por Isqüertibeleléu não estivessem correlacionadas ou emaranhadas, mas que fossem independentes. Neste caso, seu estado poderia ser fatorado (dividido) em duas partes separadas: $(N+S)_1 \cdot (N+S)_2$. O que esta notação diz é que a partícula 1 está no estado superposto ($N+S$) e a partícula 2 também. Poderíamos escrever $O_1 \cdot O_2$, se quiséssemos. Neste caso, quando Biboca medisse o estado da partícula que chega na Terra, ocorreria um colapso apenas no estado da partícula 1: se o valor obtido por ela fosse $+1/2$, o estado colapsado do par de partículas seria: $N_1 \cdot (N+S)_2$. Nada mudou no estado da partícula 2 em Titã. (Para a noção de colapso, ver o texto “O Problemático Colapso da Onda”).

No entanto, as partículas que saem do gerador estão correlacionadas num estado quântico muito diferente: $P = N_1 \cdot S_2 - S_1 \cdot N_2$. Este estado não é fatorável. Agora, quando Biboca mede o estado da partícula 1 na Terra, e obtém o resultado $+1/2$, correspondendo ao estado N_1 , o estado colapsado será $N_1 \cdot S_2$. Isso significa que a partícula 2, em Titã, está agora no estado S, de tal forma que se Astrobigoaldo medir o spin nesta direção, obterá com certeza o valor $-1/2$.

Mas notem que interessante: se Biboca não tivesse feito sua medição na Terra, o estado global continuaria sendo P, e Astrobigo não poderia ter certeza de nada com relação à sua medição.

Mas só o fato de Biboca ter adquirido um bit de informação na Terra permitiria a Astrobigo ter certeza quanto ao resultado de uma medição em Titã (claro está, porém, que ele não tem como saber instantaneamente qual é o resultado obtido na Terra, pois ele só poderia saber depois de 70 minutos). A questão metafísica é a seguinte: será que o ato de aquisição de informação, na Terra, pode alterar instantaneamente a realidade em Titã? A resposta afirmativa equivale à aceitação da não-localidade quântica. Uma resposta negativa, segundo Bell, teria que passar por um abandono da noção usual de realidade para o mundo microscópico.

Como o nosso viajante interplanetário poderia aproveitar o fenômeno de não-localidade (como quer que ele seja interpretado) para receber a informação instantaneamente da Terra? O problema é que Bibocabibes não consegue controlar qual vai ser o resultado obtido em sua medição: se ela obter o resultado N, com certeza Astro obteria S, mas Biboca poderia obter o resultado S com igual probabilidade. Ela não tem como imprimir o resultado do jogo no resultado da medição. Assim, nosso viajante em Titã não conseguirá descobrir nada a respeito de quem ganhou a Copa do Mundo.

Mas Astrobigoaldo não tem um nome tão comprido à toa: ele tem outra estratégia para obter a informação desejada. Já vimos que, aqui na Terra, Bibocabibes pode girar seu aparelho em 90° , e medir o spin na direção perpendicular. Conseqüentemente, se obtiver como resultado da medição o valor $+1/2$, sua partícula passará a estar no estado O (oeste), e se obtiver $-1/2$, sofrerá um colapso para o estado L (leste).

Antes da medição, o estado é o mesmo $P = N_1 \cdot S_2 - S_1 \cdot N_2$, mas este estado quântico tem uma simetria que nenhum estado clássico consegue ter. Tal simetria aparece quando substituimos N e S por O e L, segundo a receita $N = O+L$, $S = O-L$. O resultado obtido é $P = L_1 \cdot O_2 - O_1 \cdot L_2$, que tem a mesma forma que a versão anterior (quem fizer a conta obterá um fator 2 que surge porque não usamos coeficientes de normalização). Ou seja, a função de onda global das duas partículas tem simetria cilíndrica, ou seja, é a mesma qualquer que seja o ângulo de medição considerado. Entender esta simetria é um elemento chave para entender as discussões relacionadas com a não-localidade quântica.

A estratégia de Astrobigoaldo então é a seguinte: se o time X vencer a Copa do Mundo, Biboca fará sua medição a 0° (sem girar o aparelho), e com certeza, em Titã, a partícula estará ou no estado N ou em S; se o time Y ganhar, Biboca girará o aparelho em 90° , e a partícula em Titã terminará nos estados O ou L.

Tudo o que Astrobigo tem que fazer é descobrir qual é o estado da partícula 2 em Titã. Mas é aí que surge o problema: como conseguir isso? Suponha que Astro tenha feito a medição sem girar seu aparelho, e obteve o resultado $+1/2$, correspondente ao estado N. Isso pode corresponder a duas situações: ou o estado da partícula em Titã era de fato N (antes da medição), e assim a probabilidade de obter o resultado era 100%, ou o estado era O (ou L), caso em que a probabilidade de obter o mesmo resultado seria 50% (pois $O=N+S$). Com uma única medição, Astrobigo não tem como discernir entre essas duas situações. Ou seja, sua medição nada revela sobre a escolha de Bibocabibes.

Uma última tentativa seria enviar simultaneamente mil partículas, e fazer as medições simultaneamente para todas, mas isso também não ajudaria em nada (o comportamento de cada par de partículas seria independente dos outros pares). A única esperança seria se Astrobigo pudesse amplificar o estado da partícula em Titã, e obter mil cópias idênticas a ela. Tal amplificador, porém, é impossível de construir!

Em suma: Astrobigo precisou esperar 70 minutos para saber o resultado do jogo. Mesmo se interpretarmos a física quântica de tal maneira a supor que o colapso da onda quântica é instantâneo e não-local, não conseguimos transmitir informação de maneira controlável entre dois pontos distantes. Veremos, porém, que essa não-localidade quântica (como quer que ela seja interpretada) traz uma surpreendente novidade, com relação à nossa capacidade de realizar computações.

27. Computação Quântica

Em 2001, o grupo do físico Isaac Chuang, da Universidade de Stanford, conseguiu construir e rodar um computador quântico capaz de descobrir quais são os dois fatores primos do número 15! Sim, a resposta deste cálculo é 3 e 5, mas o dito computador teve que ser rodado várias vezes, pois às vezes ele obtinha o resultado errado! (Um número primo é aquele que só é divisível por 1 e por ele mesmo, como 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, etc.)

Por que governos de todo o mundo estão investindo milhões de dólares para construir uma máquina capaz de fatorar o número 15, e às vezes errar? Bem, a idéia é que, aos poucos, essas máquinas possam fatorar o número 21, o número 187, até chegar em um número como o RSA-129, que tem 129 dígitos, e aparece na figura abaixo, juntamente com seus dois fatores primos.

3490529510	3276913299	11438162575788886766
8476509491	3266709549	92357799761466120102
4784961990	9619881908	18296721242362562561
3898133417	3446141317	84293570693524573389
7646384933	7642967992	78305971235639587050
8784399082	9425397982	58989075147599290026
0577	88533	879543541
P-64	P-65	RSA-129

E daí? Bem, o primeiro ponto é que é muito difícil achar os fatores primos de um número como o RSA-129. Em 1994, mais de 600 pessoas de 24 países participaram com seus computadores de um esforço que durou 8 meses, e finalmente fatoraram o RSA-129, e com isso conseguiram decifrar uma mensagem secreta gerada por pesquisadores do MIT, nos Estados Unidos.

Chegamos então ao segundo ponto: essa dificuldade de fatorar números (tente achar os fatores primos de um número pequeno, como 437) é o princípio mais usado em criptografia para cifrar mensagens secretas, por exemplo em governos e em bancos. A idéia é a seguinte: Astrobigo quer passar uma mensagem telefônica secreta para Biboca amanhã, sem que um eventual grampo possa decifrar a mensagem. Assim, hoje, ele se encontra com ela e lhe passa o número P-64 (o primeiro fator primo da figura acima). Amanhã, ele pega sua mensagem, transforma em números, e multiplica por P-65, o segundo fator primo da figura. Aí ele manda esta mensagem cifrada juntamente com o número RSA-129. Biboca então pega o RSA-129, divide por P-64, e encontra a chave para decifrar a mensagem. O agente que está fazendo o

grupo não conseguirá decifrar a mensagem, pois demoraria uns oito meses para ele fatorar o RSA-129.

Está claro que o RSA-129 já não pode mais ser usado, mas o que se utiliza hoje são números com 300 dígitos, impossíveis de serem fatorados em uma vida humana com as técnicas atuais. Notem que é fácil, a partir de dois primos, como 19 e 23, calcular o produto 437, mas a operação inversa é bem mais difícil. Descobrir dois números primos como P-64 e P-65 não é tão difícil, e a partir daí é fácil gerar RSA-129, mas a operação inversa é bem mais difícil.

Pois muito bem: se o PC no qual você está agora funcionasse de maneira essencialmente quântica, você poderia fatorar em pouco tempo um número de 300 dígitos! Ou seja, se os chineses construírem tal computador antes que os americanos, os primeiros terão acesso a segredos de estado dos segundos! Então dá para entender porque tanto dinheiro está sendo investido nisso, inclusive no Brasil.

Agora precisamos explicar como funciona um computador quântico. Há dois pontos essenciais. O primeiro é que os bits quânticos são mais gerais do que os bits clássicos. Ou seja, um bit clássico, desses que são usuais em todos os computadores que usamos, tem apenas dois estados, usualmente designados por “0” e “1”. Na realidade, o “0” e “1” são estados magnéticos localizados em um ponto na memória do computador, assim podemos chamá-los de “S” (sul) e “N” (norte).

Na física quântica, porém, vale o chamado “princípio quântico de superposição”: dados dois estados possíveis, a soma ponderada deles também é um estado possível. Assim, por exemplo, $a \cdot N + b \cdot S$ também é um estado possível, onde a e b são quaisquer números complexos que satisfazem $a^2 + b^2 = 1$. Ou seja, se ao invés de usar um sistema clássico, como uma fita magnética, se utilizar por exemplo o núcleo de um átomo, podem-se codificar valores intermediários entre N e S, o que a princípio torna a computação bem mais poderosa. Essa vantagem, porém, é perdida ao se constatar que quando se faz uma medição quântica, os únicos resultados possíveis são N e S. Ou seja, mesmo que eu codifique meu bit quântico em um estado intermediário, na hora de medir só poderei obter N ou S, com determinadas probabilidades (que dependem do estado escolhido).

Esse primeiro ponto é às vezes chamado de *paralelismo quântico*. Por exemplo, considere três bits quânticos, cada um representando o dígito “1”: $N \cdot N \cdot N$. Suponha agora que transformemos cada um desses bits em uma superposição: $(N+S) \cdot (N+S) \cdot (N+S)$. Note porém que, se fizermos as multiplicações, este estado global pode ser visto como representando oito números diferentes: $NNN + NNS + NSN + NSS + SNN + SNS + SSN + SSS$. Assim, fazendo operações em três sistemas quânticos, podemos computar o resultado de uma função para oito valores de entrada, de maneira paralela (ao mesmo tempo). Porém, se quisermos resgatar o resultado final da computação para esses oito números, só conseguiremos medir três números (um para cada sistema quântico), e ainda assim com uma certa probabilidade. Ou seja, a vantagem inicial do paralelismo é perdida no final, com as medições.

Há porém um segundo ponto essencial, que dá uma vantagem para a computação quântica. Este ponto é a *não-localidade quântica*, que estudamos nos textos “Teorema de Bell para Crianças” e “Astrobigobaldo quer Informação Instantânea”. Duas partículas do computador quântico podem ser colocados em um estado “emaranhado”, e com isso eles adquirem uma individualidade holística, de tal forma que não se pode atribuir um estado quântico puro a apenas uma das partículas.

O que acontece quando o estado de duas partículas se torna emaranhado? Já vimos que não se pode transmitir informação instantaneamente. Mas pode-se alterar o estado global (envolvendo os dois bits quânticos) a partir de manipulações em apenas uma das partículas. É como se o estado global fosse um disco de cartolina preso em um arame e livre para girar em torno do arame. Mexendo em uma das pontas do disco faz o disco girar, e isso altera o que pode acontecer no outro lado do disco. São esses tipos de manipulações que trazem a vantagem da computação quântica.

Em 1994, Peter Shor demonstrou como uma computação quântica pode acelerar o cálculo do problema da fatoração de um número. Figurativamente, podemos dizer que ele mostrou como “girar” o problema em uma direção apropriada (como o disco de cartolina), fazer o cálculo de maneira mais eficiente, e depois girar de volta para obter o resultado, a partir de uma medição quântica. Como o resultado de tal medição quântica é probabilista, o algoritmo de Shor dará vários resultados errados, até acertar. Isso não é um problema, pois é fácil checar para saber se a resposta obtida está correta.

Por fim, seria preciso dizer algo sobre porque o cálculo mencionado acima (após “girar” os estados emaranhados) é mais eficiente. Isso tem a ver com semelhanças entre, por um lado, os estados ondulatórios quânticos e sua evolução no tempo, e por outro a natureza do algoritmo para fatorar números grandes. Ambos envolvem periodicidades.

Suponha que tenhamos uma onda que sobe e desce, sobe e desce. Suponha também que o que nos interessa é a frequência da onda, e não como cada ponto sobe e desce. Assim, ao invés de ficar medindo posições, é bem mais prático usar um instrumento que meça diretamente as frequências. Seria mais ou menos isso que o algoritmo quântico permite fazer de forma eficiente: ao invés de trabalhar com listas de números (análogas a posições), “gira-se” o estado envolvendo os bits quânticos (como com o disco de cartolina), medem-se as periodicidades dos números (análogas às frequências das ondas), e depois utiliza-se essa informação para gerar o resultado da computação.

Apesar dos avanços teóricos relacionados à computação quântica, ainda não se sabe o que pode ser conseguido na prática. O problema é que quanto mais bits quânticos são colocados no computador, maior é a influência deletéria das flutuações ambientais. Vimos esse fenômeno de “decoerência” no texto “A Fronteira entre o Quântico e o Clássico”. É por isso que, até hoje, o maior número fatorado por um computador quântico é apenas 15.

28. O Efeito Zenão Quântico

O efeito Zenão quântico ocorre quando a observação de um sistema impede que ele mude de estado, ao passo que se ninguém estivesse observando, ele mudaria de estado.

É como se estivéssemos esquentando água em uma panela. Se deixarmos a panela tampada, sem observar a água, ela ferve depois de cinco minutos (com gás encanado, dez minutos). Mas se a cada dez segundos levantarmos rapidamente a tampa para observar se ela já ferveu, demora um tempo muito maior para ferver. O que ocorre é que nossa observação interfere no sistema, e altera sua evolução.

É isso que acontece no efeito Zenão quântico. Um exemplo seria um núcleo radioativo. Se após uma hora medíssemos quantos átomos decaíram em uma amostra, suponha que 50%

deles o tenham feito. Porém, se medíssemos a cada minuto, no final (após uma hora) menos de 1% teria decaído! E no limite, se observássemos continuamente o núcleo radioativo, ele nunca decairia!

O efeito já tinha sido previsto por alguns físicos na década de 1960, mas foi com o trabalho de Misra & Sudarshan, em 1976, que o efeito passou a ser discutido, e seu nome foi dado.

Zenão foi o filósofo grego que lançou vários paradoxos para mostrar que, racionalmente, o movimento não pode ser compreendido. Por exemplo, o corredor Aquiles nunca poderia atingir a linha de chegada, pois haveria infinitos pontos para ele passar antes de chegar. Outro nome dado ao efeito Zenão quântico é “efeito da panela observada”.

Alguns filósofos, como o argentino Mario Bunge, atacaram a veracidade do efeito, pois não admitiriam que uma mera observação pudesse mudar a realidade. Porém, ele acabou sendo comprovado experimentalmente em 1990, por Itano e seus colaboradores. O ponto a ser ressaltado é que uma “observação” não é uma mera contemplação apolínea, distante, mas que ela envolve um forte distúrbio no átomo sendo observado. Nesse sentido, as dúvidas de Bunge puderam se dissipar, pois o experimento não desafia a sua postura filosófica “objetivista”.

A chave para entender o efeito Zenão quântico é lembrar que a cada observação ou medição ocorre um colapso da onda quântica. Os sistemas em questão envolvem uma lenta transição de um estado para outro. Ao observar constantemente um tal sistema, provocam-se colapsos constantes para o estado inicial, e ele nunca completa a transição para o outro estado.

Entraremos agora em um pouco mais de detalhe a respeito do efeito. Começemos relembando o conceito de superposição quântica, que já discutimos no texto “Onde está o Átomo de Prata?”.

Um átomo pode ser descrito em um estado que envolve duas posições diferentes, X_1 e X_2 . Antes de efetuar uma medição neste sistema, não se pode dizer que o átomo está localizado em uma posição definida. Pode-se dizer que ele está “potencialmente” em duas posições, e que é só após a medição (de posição) que ele se “atualiza” (colapsa) em uma posição bem definida.

A probabilidade de se medir a posição X_1 ou a X_2 depende dos coeficientes c_1 e c_2 que multiplicam esses termos, na descrição do estado quântico, que pode ser escrito assim: $(c_1 X_1) + (c_2 X_2)$

A probabilidade de medirmos X_1 vai ser “ c_1 elevado ao quadrado”, e analogamente para X_2 .

Para quem quiser entender melhor a notação, aí vão dois exercícios simples.

EXERCÍCIO 1: Suponha que $c_1 = 1$ e $c_2 = 0$. Qual vai ser a probabilidade de medir X_1 ? Obviamente, vai ser 1. Ou seja, neste exemplo, o átomo já se encontra na posição X_1 antes da medição.

EXERCÍCIO 2: Para qual valor de c_1 e c_2 as probabilidades são iguais? Como a soma dos quadrados dos coeficientes tem que dar 1, a resposta é que c_1 e c_2 têm valor “1 dividido por raiz de 2”, ou seja, em torno de 0,71.

Pois muito bem, chega de exercícios colegianos! Vamos para o caso que nos interessa. Em certos processos atômicos, pode ocorrer uma lenta transição entre os estados X_1 e X_2 . De início, o estado é apenas X_1 , ou seja, o coeficiente c_2 tem valor 0. Mas aos poucos, a probabilidade de X_2 vai aumentando, de tal forma que c_2 aumenta com o tempo t , por exemplo: $c_2 = at$, onde a é uma constante pequena.

Suponha que depois de uma hora resolvemos medir a posição do átomo, e suponha que a probabilidade de obter X_2 tenha subido para $\frac{1}{2}$. Assim, se houver muitos átomos, aproximadamente 50% deles serão encontrados no estado X_2 . Neste caso, o valor da constante a é 0,71 (em unidades de hora).

Agora, suponha que resolvemos observar a posição do átomo depois de apenas um minuto. Tomando $a = 0,71$, e $t = 1/60$ de hora, temos que a probabilidade de transição é o quadrado de at , ou seja, em torno de 0,00014. Em outras palavras, a probabilidade de medir X_1 é 99,992 %, e se este for de fato o valor obtido, o estado sofre um colapso e retorna para o estado inicial X_1 .

Após mais um minuto, repete-se o procedimento, e assim sucessivamente até completar uma hora. Neste caso, se houver muitos átomos, menos de 1% deles serão encontrado no estado X_2 .

Em suma, se fizermos apenas uma medição após uma hora, 50% dos átomos terão feito a transição. Se medirmos a cada minuto, ao final de uma hora menos de 1% terão feito a transição. Se medirmos continuamente, nenhum átomo faz a transição. Eis o efeito Zenão quântico!

29. O Paradoxo de EPR

Já vimos, no texto “O Primeiro Debate Einstein-Bohr”, que Albert Einstein não aceitava a interpretação ortodoxa da teoria quântica, formulada em 1928 por Niels Bohr, Werner Heisenberg e Wolfgang Pauli, entre outros. Na década de 1930, ele continuou investigando possíveis furos na interpretação ortodoxa, até que em 1935, já trabalhando na Universidade de Princeton, Einstein redigiu um importante artigo com os jovens Boris Podolsky e Nathan Rosen, trabalho este que passou a ser conhecido pela sigla “EPR”.

A conclusão do trabalho de EPR, publicado no periódico *Physical Review*, é que a teoria quântica, no estágio em que estava em 1935 (e que está ainda hoje), seria *incompleta*, ou seja, haveria elementos reais, na estrutura dos átomos, dos quais a teoria quântica não seria capaz de dar conta. Segundo o físico Léon Rosenfeld, que trabalhava com Bohr na época, “este ataque caiu sobre nós como um raio dos céus!”.

A idéia de EPR foi considerar um sistema de *duas* partículas quânticas *correlacionadas*, de tal forma que a medição direta em uma delas (que chamaremos “partícula 1”, localizada digamos na Terra) constituísse uma medição indireta na outra (a “partícula 2”, em Titã, a lua de Saturno, por exemplo). Já exploramos tais sistemas “emaranhados” em outros textos, como “Teorema de Bell para Crianças” e “Astrobigoaldo quer Informação Instantânea”. Neste último texto, tentamos explicar a peculiar natureza do estado quântico emaranhado. Por exemplo, o chamado estado de “singleto” possui uma simetria global que não existe em sistemas da física clássica: os “spins” (a direção e sentido do imã associado às partículas) das

duas partículas emaranhadas são sempre medidos em sentidos opostos (quando os dois detectores estão alinhados na mesma direção), qualquer que seja a direção dos detectores.

Na teoria quântica, já vimos também (no texto “O Problemático Colapso da Onda”) que se pode pensar que a onda quântica associada ao sistema (no nosso caso aqui, uma onda única que evolui as duas partículas) sofre colapsos instantâneos sempre que se realiza uma medição. A regra que descreve essa redução de estado é conhecida por “postulado da projeção”. Para o caso de duas partículas emaranhadas, o estado global do sistema se altera instantaneamente com a medição em apenas uma delas. Ou seja, mesmo quando as partículas estão longe uma da outra, a medição em uma delas (na Terra) altera instantaneamente o *estado* que atribuímos para a outra (em Titã). Se este estado corresponder a algo real (questão que é passível de discussão), então temos uma espécie de ação à distância, ou não-localidade.

Pode-se então dizer que, no nível do formalismo da teoria, a redução global de estado é *não-local*. EPR sabiam disso. No entanto, introduziram uma hipótese de *localidade*, que dizia, grosso modo, que a escolha sobre qual observável medir na Terra não pode afetar instantaneamente (ou com velocidade maior do que a da luz) o estado da partícula em Titã. Com duas suposições contraditórias (a não-localidade embutida no formalismo quântico, e a localidade aceita intuitivamente pela maioria dos físicos da época), não é de se espantar que EPR conseguissem argumentar que a mecânica quântica é *incompleta* (pois em um sistema lógico usual, a partir de duas teses contraditórias pode-se derivar qualquer teorema). “Somos assim forçados a concluir que a descrição quântica da realidade física através das funções de onda não é completa”.

Para apresentarmos um resumo do argumento, é preciso lembrarmos do *princípio de incerteza*, que diz que se medimos com exatidão uma grandeza como a posição de uma partícula, necessariamente uma outra grandeza estará mal definida (não podemos associar a ela um valor exato), que no caso é a velocidade (ou o momento linear) (ver texto “O Princípio de Incerteza”). Diz-se que posição e velocidade são “observáveis incompatíveis”. No caso de partículas com spin, duas variáveis incompatíveis podem ser “spin na direção z” (spin-Z) e “spin na direção x” (spin-X).

Na Terra, *posso* medir o observável spin-Z e, com isso (devido ao colapso ou postulado da projeção), o estado da partícula 2 passa a ter um valor bem definido para seu spin-Z. (Se o valor do primeiro é $+\frac{1}{2}$, o do segundo é $-\frac{1}{2}$; e se do primeiro for $-\frac{1}{2}$, o do segundo é $+\frac{1}{2}$.) Mas na Terra eu também *poderia* medir o observável spin-X, incompatível com spin-Z, e assim em Titã o estado da partícula 2 se reduziria a um valor bem definido para spin-X (que é incompatível com spin-Z).

Agora, veja bem: pela hipótese da *localidade*, suposta por EPR, nada que eu faça na Terra pode afetar instantaneamente (ou a uma velocidade maior do que a da luz) a *realidade* em Titã. Mas como eu posso medir tanto spin-Z quanto spin-X, na Terra, então tanto spin-Z quanto spin-X têm valores simultaneamente bem definidos em Titã, ao contrário do que diz a mecânica quântica (pois spin-Z e spin-X, para a mesma partícula, são incompatíveis).

Portanto, a teoria quântica não daria conta de todos os detalhes da realidade, e assim ela seria *incompleta*. A teoria quântica continua sendo considerada “correta” por EPR; ou seja, tudo que ela diz sobre os átomos é verdadeiro. No entanto, ela não diz tudo que se pode dizer a respeito da realidade (é “incompleta”).

Notemos que o argumento de EPR não envolve a realização de nenhuma medição. Na Terra, eu *posso* medir spin-Z, e eu *posso* medir spin-X. Em um caso, o spin-Z em Titã é bem definido, no outro o spin-X em Titã é bem definido. Mas como minha escolha não pode afetar instantaneamente a realidade em Titã (que está muito longe), conclui-se que os valores bem definidos (de observáveis incompatíveis) em Titã existem simultaneamente na realidade, independentemente do que se faça na Terra.

Cinco meses após o artigo de EPR, Bohr publicou sua resposta, na mesma revista. Por um lado, Bohr criticou que fizesse sentido dar um argumento que não envolvesse medições (só a possibilidade de realizar uma medição). Mais adiante, porém, ele apresentou uma frase que até hoje divide os comentaristas:

“É claro que não se coloca a questão, em um caso como o considerado, de um distúrbio mecânico no sistema considerado, durante o derradeiro estágio crítico do procedimento de medição. Mas mesmo neste estágio há essencialmente a questão de *uma influência nas próprias condições que definem os tipos possíveis de previsões relativas ao comportamento futuro do sistema*”.

Ou seja, por um lado, ao descartar um “distúrbio mecânico”, Bohr parece aceitar o princípio de *localidade* de EPR; mas logo em seguida ele afirma que a própria “definição” do sistema composto de duas partículas depende da escolha feita pelo experimentador com relação a uma das partículas, o que é uma maneira de reafirmar o caráter *não-local* da mecânica quântica.

Hoje em dia, alguns autores, como John Bell, consideram a resposta de Bohr insatisfatória. Outros autores, como Don Howard, reconstroem a posição de Bohr como sendo a de uma aceitação da *localidade* e uma rejeição da *separabilidade*, distinção esta que ressurgiu nas discussões mais recentes sobre o teorema de Bell (distinção entre localidade controlável e localidade incontrolável).

Uma resposta um pouco diferente foi dada por Pauli, em 1948. Ele salientou que o *estado quântico* deve ser interpretado de maneira “epistêmica”, apenas como um instrumento matemático para se fazerem previsões, e não como uma entidade real. Assim, o fato de a redução de estado ser não-local não violaria a condição de localidade, esta sim valendo na realidade.

Hoje em dia é comum se dizer que “Einstein errou” ao enunciar o seu paradoxo com Podolsky e Rosen (ver por exemplo a revista *La Recherche* de abril de 2008). Qual teria sido seu erro? Para alguns, é a defesa do princípio de localidade. Para outros, é a insistência em falar de uma realidade independente da medição. De fato, EPR partem de uma hipótese de localidade (controlável e incontrolável), e ao concluírem que a mecânica quântica seria incompleta, acabam por defender uma interpretação realista. Porém, o resultado básico do teorema de Bell e dos experimentos subsequentes é que *teorias realistas locais* são insustentáveis, e seria esta a concepção que está implícita na conclusão do artigo de EPR. Assim, Einstein errou, mas o seu erro foi muito frutífero, gerando trabalhos importantes de Schrödinger e Furry, em 1935, e posteriormente inspirando a interpretação causal de David Bohm (1952), que acabaria levando ao teorema de Bell (1964).

O historiador da ciência Max Jammer, em seu livro *The Philosophy of Quantum Mechanics*, examina em detalhes a proposta do paradoxo de EPR, e cita (p. 187) uma conversa que Einstein teve a respeito da reação ao seu trabalho, dizendo que ele recebeu várias cartas de

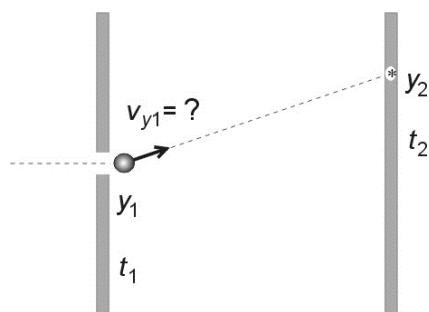
físicos apontando qual seria o erro de seu argumento. O que divertia Einstein era que todos afirmavam com segurança que ele estava errado, mas cada um dava uma razão diferente para sua afirmação!

Vale também mencionar que uma situação análoga ao arranjo de EPR (que, por sinal, não envolvia os observáveis de spin, mas sim posição e velocidade) fora examinada em 1931 por Carl von Weizsäcker, aluno de Heisenberg. Porém, no contexto da interpretação ortodoxa tal situação não parecia paradoxal, e um argumento de incompletude não fora derivado.

30. Retrodição é Especulação?

No texto “O Princípio de Incerteza”, mencionamos que o princípio de incerteza não vale para o passado, mas é uma limitação para medições presentes e futuras. Esta questão toca na interessante noção de *retrodição*, que precisamos examinar para poder falar de certas interpretações da teoria quântica, como a transacional e a das histórias consistentes (que veremos mais para frente).

Suponha que a posição vertical y_1 de uma partícula livre (ver figura abaixo) seja medida com boa resolução no instante t_1 , resultando (pelo princípio de incerteza) em um pacote de onda com grande indeterminação de velocidade v_{y1} . Tal medição pode ser efetuada simplesmente selecionando uma partícula que passa por uma fenda localizada em y_1 num instante conhecido. Posteriormente, num instante t_2 , mede-se novamente a posição y_2 da partícula.



Levando em consideração que a partícula está livre de forças entre as duas medições, é plausível supor que ela descreve um movimento retilíneo uniforme (ou seja, segue uma reta com velocidade constante) entre os instantes t_1 e t_2 . Com isso, pode-se calcular o valor da velocidade v_{y1} logo após o instante t_1 , quando a partícula estava localizada na posição y_1 (fica como exercício). Ora, mas isso significa que determinamos simultaneamente, de maneira exata, a posição e velocidade (na direção y) logo após o instante t_1 , o que violaria o enunciado do princípio de incerteza!

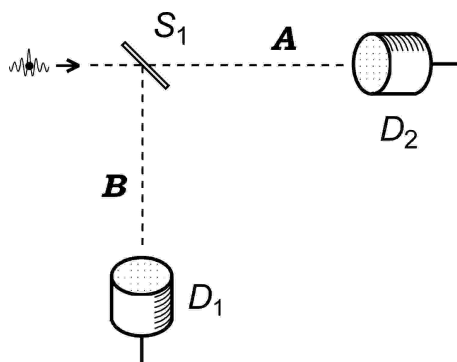
O que está acontecendo? Antes de mais nada, notemos que fizemos uma inferência em relação a uma situação *passada* (ou seja, após medir y_2 , inferimos v_{y1}). O grande físico dinamarquês Niels Bohr chamou isso de *retrodição*, e em 1928 ele tinha uma opinião negativa com relação a este tipo de inferência, referindo-se à retrodição como uma “abstração, a partir da qual

nenhuma informação sem ambigüidades concernente ao comportamento prévio ou futuro do indivíduo pode ser obtida.”

Seu colega mais jovem, o alemão Werner Heisenberg, também tinha uma opinião negativa a respeito da retrodição. Ele discutiu esta questão nas suas palestras de Chicago, publicadas em 1930, notando que “a relação de incerteza não se refere ao passado [...] Este conhecimento do passado é de caráter meramente especulativo [...] É uma questão de crença pessoal se a tal cálculo referente à história passada do elétron pode ser atribuída qualquer realidade física ou não”. Ou seja, para Heisenberg, retrodição seria mera especulação.

No entanto, em 1935, após o artigo de Einstein, Podolsky & Rosen (1935), Bohr teve que introduzir modificações em sua interpretação da teoria quântica, baseada no conceito de “complementaridade”. Passou então a definir o quadro “ondulatório”, em que se pode observar franjas de interferência, e o quadro “corpuscular”, em que se pode inferir a trajetória trilhada por um quantum detectado (ver o texto “A Escolha Demorada”). Ora, esta inferência sobre qual foi a trajetória do quantum é justamente um exemplo de retrodição! Ou seja, aquela noção que Bohr e Heisenberg consideravam mera “especulação” em torno de 1928 passou a ser adotada por Bohr, em 1935, como parte integral de sua interpretação da complementaridade.

Nem todas as interpretações aceitam a retrodição. Por exemplo, uma interpretação estritamente ondulatória, que inclui a noção de colapso, rejeita a retrodição. Por exemplo, considere o seguinte experimento, que é um dos mais simples que existem:



Um pulso de luz, associado a um fóton, passa pelo espelho semi-refletor S_1 . O que acontece? Segundo uma visão ondulatória (realista), o pacote de onda se divide em duas partes, uma rumando por A e outra por B. Quando essas duas amplitudes interagem com os detectores D_1 e D_2 , ocorre um colapso, e o fóton aparece em apenas um detector (e nada resta no outro). No entanto, logo antes da medição, as ondas estavam divididas entre os dois caminhos, não havendo uma trajetória única.

Por outro lado, não é assim que a interpretação da complementaridade analisa a situação. Para esta visão (instrumentalista), só se pode afirmar alguma coisa após o término do experimento. Se o fóton aparece em D_2 , então, por retrodição, infere-se que ele seguiu a trajetória A, e nada seguiu por B.

O uso da retrodição é bastante plausível, e se encaixa bem em nossa intuição clássica a respeito de partículas. Porém, a retrodição pode também ser aplicada para fenômenos ondulatórios, mas deixaremos para examinar isso quando estudarmos a interpretação das histórias consistentes (que é um desenvolvimento mais recente da interpretação de Bohr).

E para você? Retrodição de trajetórias passadas é mera especulação ou corresponde à realidade?

31. A Interpretação Transacional

Em 2003, foi fundado na Turquia o periódico *NeuroQuantology*, disponível on-line, que examina questões relacionadas à mente e ao cérebro a partir da perspectiva da física quântica. O periódico não é levado a sério pela maioria dos cientistas ortodoxos, e pode-se dizer que ele representa pesquisa que está na zona limítrofe entre ciência e pseudociência. Os dois lados do “dilema do místico” (ver texto “O Dilema do Místico”) estão representados nesta revista eletrônica. A atitude desafiadora é exemplificada pelas propostas de explicação quântica para o “efeito micropsicocinético”, ou seja, a possibilidade de a mente afetar objetos microscópicos sem a intermediação de instrumentos materiais. A atitude mais conciliadora é exemplificada pelos artigos do filósofo brasileiro Alfredo Pereira (Unesp-Botucatu), que propõe mecanismos para explicar certos comportamentos dos neurônios (as células em nosso cérebro) a partir da física quântica. Apesar de não haver evidências experimentais para suas especulações, sua atitude geral não desafia os princípios mais bem estabelecidos da ciência ortodoxa (que definimos no texto “O que é a Ciência Ortodoxa?”).

No primeiro número deste periódico, o matemático C. King, da Nova Zelândia, investiga o possível papel da noção de “caos determinístico” para a explicação da consciência. Este problema foi levantado por Skarda & Freeman (1987), e é razoável se supor, especialmente de uma perspectiva materialista, que dinâmicas desse tipo estejam presente no cérebro (não se trata de um fenômeno quântico, mas sim de um desenvolvimento da física clássica). A novidade de King foi apresentar sua análise dentro da “interpretação transacional” da teoria quântica. Que interpretação é essa?

A interpretação transacional foi proposta pelo físico John Cramer em 1986 (*Reviews of Modern Physics* 58 647-87). Ela é bastante difícil de entender, mas aspectos gerais podem ser apresentados de maneira qualitativa. Uma de suas vantagens é que, desde o início, ela incorpora os princípios da teoria da relatividade restrita. Isso é interessante, pois uma das limitações das discussões usuais da mecânica quântica, envolvendo a famosa equação de Schrödinger, é que elas valem apenas para objetos com velocidades baixas (muito menores do que a velocidade da luz).

A idéia básica da interpretação transacional é que existe um outro tipo de onda, chamada “onda avançada”. As ondas com que estamos acostumados são chamadas de “ondas retardadas”, e elas se propagam para o futuro, com energia positiva. As ondas avançadas se propagariam *para o passado*, com energias *negativas*! Com isso, tem-se uma descrição temporalmente simétrica, que vale igualmente para o passado e para o futuro. Tal formalismo temporalmente simétrico foi introduzido pelo grande físico teórico Paul Dirac (1938). Em 1945, John Wheeler e seu aluno Richard Feynman introduziram a noção de uma “transação” entre um emissor e um absorvedor, dentro da teoria eletromagnética clássica.

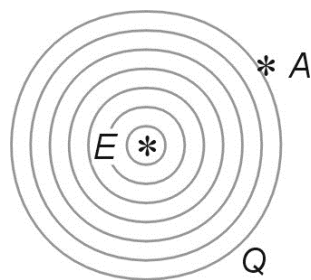
Uma transação consiste no seguinte. Imagine um *emissor*, que pode ser um átomo de bário (como Astrid, cuja fotografia vimos no texto “É Possível ver um Átomo?”), que emite uma onda retardada de luz para o futuro. Esta onda acaba sendo absorvida por outro átomo, por exemplo um átomo na retina de nosso olho (mais especificamente, a molécula rodopsina em uma célula de bastonete), que é o *absorvedor*.

No entanto, o emissor não emite apenas uma onda retardada para o futuro, ele também emite (segundo esta interpretação) uma onda avançada para o passado. O mesmo ocorre com o absorvedor. Quando ele recebe a onda do emissor, o absorvedor emite uma onda retardada (para o futuro) que anula a onda retardada provinda do emissor (interferência destrutiva, ver texto “O Conceito de Onda”). Ou seja, a onda que se originou no emissor desaparece após passar pelo absorvedor, pois este emitiu uma onda que consegue cancelar totalmente a onda original. Porém, o absorvedor também emite uma onda avançada, que se propaga para o passado, em direção ao emissor. Voltando para o passado, ao atingir o emissor, essa onda (vinda do absorvedor) interfere destrutivamente com a onda avançada gerada pelo emissor. Ou seja, ocorre um cancelamento de ondas também para o passado, anterior ao primeiro ato de emissão.

O processo não termina aí. O emissor, ao receber a onda avançada do futuro, pode reemitir outra onda (um eco), e o processo pode continuar por mais algumas etapas. Globalmente, o que se tem é uma transação (um “aperto de mão”) entre emissor e absorvedor, e fora disso tudo se anula. A transação seria o análogo quadridimensional (espaço-temporal) de uma onda estacionária (tridimensional) entre duas paredes.

Segundo essa interpretação, o Universo seria um imenso amontoado de transações. A grande vantagem desta visão é que ela incorpora naturalmente as imposições da teoria da relatividade restrita. Outra vantagem é que a interpretação transacional assume explicitamente a não-localidade que surge nas investigações do teorema de Bell, por meio de sua descrição “atemporal”, que permite que ondas vão para o futuro e para o passado.

O tratamento do colapso da onda quântica é interessante. Em primeiro lugar, é preciso introduzir o “quantum de ação” (ou seja, o fato de que a luz é detectada, numa tela fosforescente, na forma de pontinhos com energia discretizada) como um princípio adicional, que Cramer considera uma “condição de contorno”. Admitido isso, o colapso seria expressão do processo de transação entre emissor e absorvedor. Sendo assim, o colapso não seria um processo instantâneo, mas envolveria todo intervalo de tempo em que se dá a transação. Considere a figura abaixo.



Uma onda esférica retardada é “oferecida” por E , e é absorvida em A . Isso equivale a dizer que A “confirma” o recebimento da onda, enviando uma onda avançada de volta (no sentido do passado) para E . O emissor E então retorna um eco para A , e assim sucessivamente, até que se estabelece a transação. Feito isso, pode-se dizer que a luz seguiu uma *trajetória retilínea* de E para A , e isso equivale a dizer que houve um colapso da onda inicialmente espalhada. Notamos, assim, que a interpretação transacional de Cramer incorpora a noção de “retrodição”, presente na interpretação da complementaridade (ver texto “Retrodição é Metafísica?”). O que aconteceu com a onda retardada inicial, de forma esférica, presente também na região de Q ? Segundo Cramer, ela continuaria se propagando, como uma onda vazia que não transfere energia a nenhum átomo. Esse aspecto da interpretação não é muito elegante.

Cramer salienta que sua interpretação não necessita de um observador consciente (ver o texto “A Consciência Legisladora”) para explicar o colapso da onda quântica, pois este processo de colapso está implícito na definição de uma transação entre emissor e absorvedor.

Um problema conceitual com essa interpretação é a possibilidade de se ter uma relação causal em que o futuro provoca um efeito observável e controlável no passado. Cramer nega que isso possa acontecer no nível macroscópico, controlável por um cientista. Ou seja, um “princípio fraco de causalidade” é preservado com sua interpretação. Porém, no nível microscópico, passado e futuro seriam simétricos, e um absorvedor (no futuro) pode causar um efeito (uma onda avançada) em um emissor no passado: violar-se-ia assim o princípio forte de causalidade.

32. Quatro Aspectos Essenciais da Física Quântica

Após um período fora do país, retorno a esta coluna do Vya Estelar, onde busco apresentar de maneira didática diferentes temas relacionados com a física quântica. Não sou um adepto da “psicologia quântica”, ou seja, não acredito que a física quântica seja de fato relevante para entender a mente humana e sua interação com o mundo. Também não tenho uma visão de mundo mística, teísta ou gnóstica, pois não considero que haja inteligência fora do corpo material dos seres vivos (sou portanto “materialista”). Porém, imagino que as breves explorações que faço da física quântica possam ser de interesse para aqueles que queiram conhecer um pouco mais dessa fascinante teoria, quaisquer que sejam suas posições filosóficas. É possível dialogar com visões antagônicas a nossas, assimilar parte das ideias expostas, e traduzir outra parte para nossa concepção pessoal.

Para reiniciarmos nossas viagens pelo mundo quântico, gostaria de examinar a seguinte questão: qual é a diferença essencial entre física clássica e quântica?

a) Ondas de Matéria

Para responder a essa questão, podemos considerar a física clássica das ondas ([ver texto 3](#)) e sua extensão para toda a matéria. Ou seja, o ponto de partida da física quântica pode ser tomado como a tese de que tanto a matéria quanto a radiação (luz, etc.) são regidas por uma equação de onda, como a chamada equação de Schrödinger. Para uma única partícula, a onda associada se propaga nas 3 dimensões espaciais (que são largura, altura e profundidade).

A concepção das ondas materiais, proposta por Louis de Broglie em 1924, é uma profunda ruptura com a física clássica, mas por si só não constitui uma teoria quântica, já que existem muitos sistemas clássicos que se comportam como onda (como as ondas do mar, o som, a luz).

Implícito nesta tese de que a matéria é ondulatória está o “princípio de superposição”: dados dois estados permitidos de um sistema, uma soma destes estados é sempre um estado permitido. Este princípio não vale em algumas situações (onde se aplicariam regras chamadas de “superseleção”). Há também teóricos que especulam que o princípio de superposição pode não valer de maneira exata, mas apenas como uma aproximação.

Partindo então desse primeiro ponto, de que tanto a matéria quanto a radiação devem ser descritas como ondas, proponho que apenas três aspectos adicionais precisam ser impostos para obtermos a física quântica (deixando de lado a teoria da relatividade, que introduz outras complicações, como a existência de antimatéria).

b) Quantização na Medição

O segundo aspecto essencial da teoria quântica pode ser chamado “quantização na medição”. Vimos na primeira lição de física quântica ([texto 4](#)) que quando uma frente de onda incide em uma tela detectora, o que aparecem são pontos, que surgem um a um. Esta é uma propriedade essencialmente quântica, totalmente inesperada para a física clássica de ondas, e descoberta (indiretamente) por Max Planck em 1900.

Vimos que há uma classe de interpretações da teoria quântica que defendem que o que está ocorrendo neste caso é um repentino “colapso” da onda ([ver texto 5](#)), ocasionado pela medição (que sempre envolve um aparelho macroscópico). Outra interpretação, a da complementaridade, desenvolvida por Niels Bohr, trabalha com o conceito de “dualidade onda-partícula” ([ver texto 10](#)). São diferentes maneiras de conciliar os aspectos ondulatório e corpuscular da matéria e da radiação, diferentes tentativas de explicar a aparência pontual das medições de posição, ou o fato de que medições de energia não podem ocorrer abaixo de uma certa quantidade mínima.

Pode-se considerar também que as ondas de matéria são “ondas de probabilidade”, e que a probabilidade de ocorrer uma medição em uma certa posição é dada pelo quadrado da amplitude da onda naquela posição. É preciso também estipular qual é o estado da onda após a ocorrência do colapso (usualmente descrito por um “postulado da projeção”).

Há quem considere o princípio de incerteza ([ver texto 12](#)) como um aspecto essencial da teoria quântica. No entanto, uma versão deste princípio ocorre na física clássica de ondas, e a novidade do caso quântico surge justamente ao se aplicar a “quantização nas medições” para o caso em que dois observáveis incompatíveis podem ser medidos.

O mesmo comentário vale para outro efeito bastante curioso da física quântica, o chamado “efeito túnel”, que ainda não tivemos oportunidade de explorar.

c) Não-Localidade Quântica

No caso em que duas partículas interagem e se separam espacialmente, vimos ([nos textos 18 e 26](#)) que podem ocorrer correlações entre medições simultâneas, correlações essas que não podem ser explicadas por “teorias realistas locais” (este é o famoso resultado obtido por John Stuart Bell). Essa situação tem sido chamada de “não-localidade quântica”, apesar de os

aspectos filosóficos do efeito serem ainda mal compreendidos. Outro termo que pode ser usado é “sincronicidade quântica”, já que não se trata de um efeito causal controlável, obtido a partir da medição em uma das partículas, gerando um efeito na outra.

A não-localidade quântica só pode ser tratada a partir dos princípios 1 e 2 (definidos acima) se as ondas materiais a serem consideradas forem descritas em um espaço de configuração de 6 dimensões (no caso de duas partículas interagentes). Em outras palavras, a onda que descreve o sistema de duas partículas precisa ser definida em 6 dimensões, e não nas 3 dimensões espaciais usuais!

É a não-localidade quântica que é responsável pelo ganho de eficiência da computação quântica sobre a computação clássica ([ver texto 27](#)).

d) Estatísticas Quânticas

Há um quarto aspecto dos sistemas quânticos, não contemplados pelos três princípios anteriores, que está relacionado com o valor do “spin” de uma partícula ([ver texto 6](#)). Partículas de spin inteiro (0, 1, 2) são chamados “bósons”, e de spin semi-inteiro (1/2, 3/2, etc.) são chamados “férmions”.

Tais partículas têm comportamento diferente quando um grande número delas estão próximos. Em termos quânticos, diz-se que inúmeros bósons podem ocupar o mesmo estado, ao passo que dois férmions nunca ocupam o mesmo estado (este é o princípio de exclusão de Pauli). Em termos clássicos (como na teoria de David Bohm, [ver texto 23](#)), isso equivaleria a dizer que férmions se repelem, ao passo que bósons se atraem, mas em termos modernos não se atribui uma força de interação para esse comportamento. Fala-se que seu “comportamento estatístico” é diferente do caso clássico, e diferente entre si ([ver texto 24](#)).

Partículas materiais, como prótons, nêutrons e elétrons, são férmions, ao passo que carregadores de interação, como um fóton de luz, são bósons. Um par de férmions pode adquirir comportamento de bóson. Em um sistema fechado, o número de férmions se conserva, ao passo que um sistema de bósons não tem um número bem definido de partículas.

Exemplos de sistemas que apresentam comportamento estatístico dos bósons é a luz laser e gases ultrafrios, que formam os chamados “condensados de Bose-Einstein”. Um exemplo de sistema com comportamento estatístico dos férmions é o fluido de elétrons que carrega corrente elétrica em um fio metálico.

33. O Interessante Engodo da Gnose Científica

Em 1974, o filósofo da biologia francês Raymond Ruyer (1902-87) lançou um livro intitulado *A Gnose de Princeton*, que foi um sucesso de vendas, e lançado no Brasil pela editora Cultrix em 1989. Nele, ele descreve um grupo não-identificado de cientistas norte-americanos que estavam desenvolvendo uma nova religião com base na ciência moderna, especialmente na cosmologia (a ciência do Universo como um todo) e na teoria da informação biológica.

Tal grupo se considerava herdeiro da antiga tradição gnóstica, uma corrente herética do cristianismo, no séc. I d.C., influenciada pela filosofia de Platão, que pregava que podemos conhecer Deus e o mundo suprasensível através da ciência. Eis um resumo de algumas de suas teses, obtido do historiador da ciência J.R. Partington:

1) O Deus supremo é diferente do criador do mundo ou do Deus do Velho Testamento, às vezes considerado um ser maligno. 2) A matéria existe, é eterna, mas é má. 3) O mundo atual é o resultado da “queda” ou erro feito, na criação, por um ser mau, fraco ou ignorante. 4) Os “éons”, classe de poderes ou seres que emanam do Ser Supremo, são forças reais, e o eón Cristo é diferente do homem Jesus. 5) A alma caiu do mundo superior, e só pode ser libertada de sua prisão na matéria por um deus salvador que descenda com esta finalidade. 6) Há várias classes de homens, e só os gnósticos são capazes de salvação.

A “gnose científica”, “nova gnose”, ou “gnose de Princeton” não defende esses pontos específicos, mas parte da ideia de que o Universo é um ser vivo e consciente, um Sujeito totalmente abrangente, do qual nós, consciências individuais limitadas, conseguimos conhecer melhor a partir da ciência. A gnose científica teria surgido a partir do desenvolvimento da cosmologia nas décadas de 1950 e 60. A origem da informação, tão importante no reino biológico, não poderia ser o mero acaso dos encontros fortuitos de moléculas, como quer o materialismo, mas estaria no próprio “big bang”, o início do nosso Universo, um Universo onde a “forma” dominaria a matéria.

Na revista *Planeta*, de junho de 1977, Olavo de Carvalho, hoje um bem conhecido filósofo e polemista, anunciava para o público brasileiro as novidades do livro de Ruyer. “Nas últimas décadas, operou-se, no interior do conhecimento físico do universo, [...] uma revolução silenciosa. No retiro dos seus laboratórios, a mais refinada elite da ciência norte-americana (que não inclui só norte-americanos, mas japoneses, russos, italianos etc.) chegava à conclusão de que não só a hipótese materialista não bastava para explicar uma quantidade crescente de fenômenos, mas que essa quantidade crescente de fenômenos convergia irremediavelmente em favor da hipótese contrária” (texto disponível na web).

Há porém um problema com toda essa estória... Esse grupo de cientistas gnósticos de Princeton nunca existiu, foi uma ficção inventada por Ruyer, um engodo!

Este fato, que aparece em sua biografia na Wikipedia, é deveras interessante. Por um lado, ele mostra como todos gostam de invocar a autoridade da ciência em defesa de suas ideias. Por outro lado, a existência do engodo a rigor não deveria afetar a plausibilidade da filosofia mística de Ruyer, herdeira da tradição que chamamos “naturalismo animista” (ver texto “O que é a Ciência Ortodoxa”). O juízo que fazemos de um corpo de ideias deveria ser independente de quem as defende. E apesar de não haver a “gnose de Princeton”, há de fato vários cientistas e cosmólogos – muitos citados por Ruyer – que defenderam ideias místicas em algum momento de sua carreira: Arthur Eddington, James Jeans, J.B.S. Haldane, Fred Hoyle, John Eccles, Arthur Koestler, e numa certa medida David Bohm e Eugene Wigner. Por “misticismo”, entendo a tese de que a natureza fora dos corpos de seres humanos e de animais superiores seja imbuída de características espirituais, como inteligência, vontade e sentido, o que se opõe ao “materialismo”.

O livro de Ruyer tem ideias interessantes, e faz menções frequentes e geralmente corretas a discussões científicas, mas sua exposição não é didática e nem rigorosa. Sua posição básica é de que a toda a Natureza é imbuída de um Espírito, que dá sentido aos processos naturais, especialmente na biologia. Sua filosofia não teve impacto entre cientistas, mas o seu “neo-finalismo” influenciou alguns filósofos franceses, além de ter tido mais influência entre os círculos esotéricos (uma análise de suas ideias é feita por R.A. Wiklund, *Philosophy and Phenomenological Research* 21, 1960, pp. 187-98).

No capítulo VII ele caracteriza corretamente a posição materialista de que a ordem pode surgir do acaso, e não pretende “refutar” o materialismo, mas sim contrapô-lo à sua visão neognóstica. Posições metafísicas geralmente não podem ser refutadas, pois elas envolvem teses a respeito de entidades e processos inobserváveis, que não são passíveis de verificação experimental.

O mais interessante de tudo isso é que ideias semelhantes às de Ruyer vêm sendo propostas por alguns cientistas contemporâneos, que buscam atribuir uma inteligência ao Universo como um todo. Seth Lloyd (*Programming the Universe*) explora essas ideias de maneira mais conservadora, ao passo que Frank Tipler (*The Physics of Immortality*) imagina que se o Universo entrar num colapso final (big crunch), sua capacidade computacional se tornaria infinita, recriando civilizações passadas de maneira virtual. Alguns cosmólogos, como o respeitável trio Fahi, Guth & Guven, entre outros, especulam que uma civilização avançada poderia ter a capacidade de criar novos universos. O conhecido cientista e divulgador Paul Davies também tem explorado questões semelhantes em seu livro *The Mind of God*.

Essas ideias estão longe de serem hegemônicas na comunidade científica, mas indicam que há espaço para ideias místicas na ciência.

34. O que aconteceria se viajássemos à velocidade da luz?

O que aconteceria se viajássemos à velocidade da luz? Pergunta mal formulada! Nós nunca poderíamos atingir a velocidade da luz, que é de $c = 300$ mil km/s (equivalente a 7 voltas e meia em torno do equador da Terra em um segundo). Tal impossibilidade foi formulada por Albert Einstein em 1905, com sua teoria da relatividade restrita.

É curioso que quando Einstein tinha 16 anos (por volta do início de 1896), ele começou a imaginar o que aconteceria se alguém viajasse à mesma velocidade que a luz, e ficasse observando as ondas de luz. Elas pareceriam paradas, o que já lhe sugeriu que havia algo errado com esta situação, permitida pela física clássica aceita na época. Este e outros problemas teóricos e experimentais o levaram à nova teoria em 1905, que estava apenas parcialmente desenvolvida por outros físicos (Lorentz e Poincaré).

O que acontece, segundo a teoria da relatividade, é que se um corpo com massa (o que exclui a luz, que não tem massa de repouso) começa a ser acelerado, adquirindo uma velocidade cada vez maior, a sua própria massa começa a aumentar, de forma que vai se tornando cada vez mais difícil acelerar o corpo. Um próton, partícula que compõe o núcleo dos átomos, pode ser acelerado, no acelerador de partículas do CERN (na Suíça), até atingir uma velocidade igual a 99,99% da velocidade da luz c . Neste caso, sua massa aumenta 100 vezes! Se mais energia for dada a este próton, ele aumentará sua velocidade, mas nunca conseguirá atingir c .

Outra maneira de tentar suplantar este limite é imaginar que estamos num foguete que voa a 30% da velocidade da luz, em relação à Terra. Dentro deste foguete, podemos imaginar que consigamos fazer um próton voar a 90% da velocidade da luz. Qual será a velocidade do próton para alguém que observa da Terra? Ora, se somarmos a velocidade do próton 0,9 c com a do foguete 0,3 c , obteríamos 1,2 c , que seria maior do que a velocidade da luz! Porém, a teoria da relatividade mostra que a composição de velocidades não se dá por mera soma, mas sim de acordo com uma fórmula mais complicada, que resultaria numa velocidade do próton, em relação à Terra, de 0,94 c .

Em suma, não dá para atingirmos a velocidade da luz. Não vale à pena ficar especulando sobre “o que aconteceria se atingíssemos a velocidade da luz...” Ficaria tudo escuro? Tudo viraria energia? Voltaríamos para o passado? Balela! Não dá! É uma situação impossível, segundo o que nos diz a teoria da relatividade restrita.

Uma consequência disso é que não é possível *transmitir informação* a uma velocidade maior do que c . Se você está na lua Titã, de Saturno, e quer saber quem ganhou a Copa do Mundo na Terra, demorará em torno de 70 minutos, após o apito final, para saber quem ganhou. Nem a física quântica pode mudar isso (ver texto 26, “Astrobigobaldo quer Informação Instantânea”).

No entanto, em 1994, o físico alemão Günter Nimtz anunciou ter conseguido transmitir a 40ª sinfonia de Mozart em um guia de microondas a uma velocidade 4,7 vezes a da luz! Como isso seria possível?

Antes de mais nada, lembremos que microondas são “radiação eletromagnética”, assim como a luz. Existe uma ampla gama de radiação eletromagnética, dependendo do comprimento da onda associada. Nosso olho é sensível apenas a uma estreita faixa desta radiação, entre 400 e 700 nanômetros (um bilionésimo de metro). Ondas de comprimento maior são a radiação infravermelha, que vai até 1 milímetro. As microondas têm tamanho entre 1 mm e 10 cm, e ondas mais longas são as ondas de rádio. Ondas de comprimento menor do que a luz visível são o ultravioleta, depois o raio X, e finalmente os raios gama. Todos se propagam à mesma velocidade c no vácuo (nos meios materiais, eles perdem um pouco de velocidade).

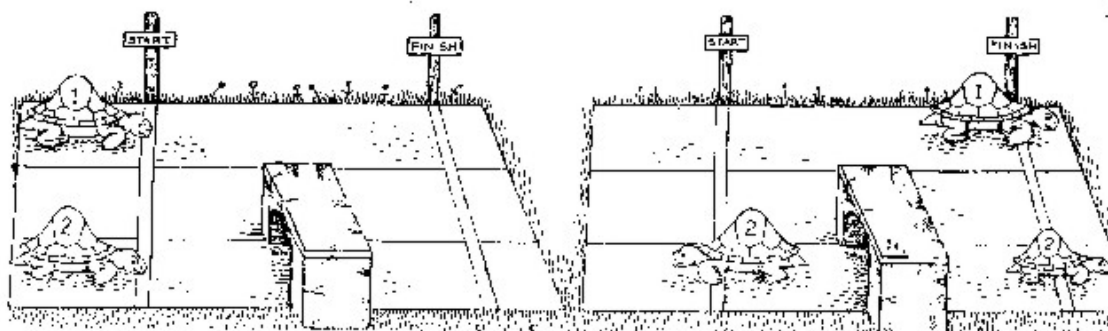


Figura tirada do artigo de Chiao, R.Y.; Kwiat, P.G. & Steinberg, A.M., “Faster than Light?”, *Scientific American*, vol. 269, agosto de 1993, pgs. 38-46.

Mas voltemos às microondas de Nimtz, que transmitem informação com velocidade 4,7 c . Como isso seria possível? Na verdade, o que acontece é que o sinal é carregado por um “pacote” de onda que tem uma certa extensão espacial (bem maior do que o comprimento da onda). Na figura acima, os pacotes de onda são representados por tartarugas. O grosso da informação é carregado pelo centro do pacote de onda, ou seja, pela corcova da tartaruga. Do lado esquerdo, vemos duas tartarugas, “1” e “2”, iniciando a corrida ao mesmo tempo. O pacote de onda “2”, porém, atinge uma barreira: parte é refletida, e uma parte menor é transmitida por um efeito de “tunelamento”. Notamos que, ao final, a cabeça de ambas as

tartarugas cruzam a linha de chegada ao mesmo tempo, seguindo a velocidade da luz. Porém, a corcova da tartaruga “2”, que ficou menor, chega antes da corcova maior da tartaruga “1”. É só nesse sentido que Nimtz conseguiu enviar informação a uma velocidade “superluminosa” (maior do que a da luz). A *frente* de um pacote de onda luminoso não pode exceder c , mas o seu pico pode!

Visto isso, levantemos um último paradoxo. Acredita-se que o Universo surgiu de um processo semelhante a uma explosão (o *big-bang*), e que sua idade é em torno de 13,7 bilhões de anos. O diâmetro estimado para o universo visível é de 93 bilhões de anos-luz, ou seja, uma distância na qual a luz demoraria 93 bilhões de anos para percorrer. Mas como é que os objetos do Universo conseguiriam atingir um raio de 46,5 bilhões de anos-luz, a partir de uma explosão inicial, em apenas 13,7 bilhões de anos? Não dá!

A solução é fornecida pela moderna teoria da gravitação, desenvolvida a partir da obra-prima de Einstein, a teoria da relatividade geral de 1916. A tese é que no início do Universo houve uma grande “inflação” do espaço, ou seja, o tamanho do Universo aumentou a uma taxa muito maior do que a velocidade da luz. Em outras palavras, o espaço pode se esticar a uma velocidade maior de que a da luz, mas os processos físicos que ocorrem dentro deste espaço não podem exceder a velocidade limite da luz.

35. Por que há tantas interpretações da teoria quântica?

Ao longo dos textos sobre física quântica apresentados neste sítio, diversas interpretações da teoria quântica foram apresentadas. Há dezenas de interpretações diferentes, e interpretações novas vão surgindo a cada ano. Por que acontece isso com a física quântica?

No ensino médio o que nos é ensinado é chamado de “física clássica”. Aprendemos a calcular a aceleração de um bloco que desce um plano inclinado sem atrito, e as leis de Newton nos são ensinadas como se fossem a palavra final em ciência. Quem duvida que exista uma força da gravidade, representada em cada ponto por uma setinha chamada “vetor”?

Na escola ninguém duvida disso, mas nos séculos XVIII e XIX a questão de se existiam forças que agem à distância, como a força da gravidade, era muito debatida, e havia outras interpretações da mecânica clássica que evitavam dar ao conceito de força um estatuto de realidade. O mesmo acontecia com a teoria do eletromagnetismo, onde se discutia se os efeitos magnéticos são realmente distintos dos elétricos, com a teoria do calor, com a óptica, etc.

Em suma, apesar de uma teoria científica ter um núcleo de teses “objetivas” e aceitas por todos, que refletem o que é observado nos experimentos dos cientistas, outra parte dessa teoria envolve teses “interpretativas” ou convencionais, que não podem ser comprovadas diretamente através de experimentos, mas que têm um papel na articulação dos conceitos da teoria. Na educação científica, há uma tendência de se apresentar apenas uma interpretação de uma teoria científica, já que não se quer complicar as coisas para o aluno. Mas, na verdade, sempre há discordâncias sobre como interpretar teorias científicas.

Os cientistas não dão muita bola para essas diferenças enquanto seu trabalho de pesquisa vai indo bem, mas quando surgem discussões que não podem ser decididas imediatamente por

experimentos, discussões muitas vezes envolvendo verbas para pesquisa ou o prestígio dos cientistas, então os cientistas se envolvem em discussões filosóficas sobre qual é a melhor teoria (supercordas ou gravidade quântica “em loop”? – para mencionar uma controvérsia recente) ou a melhor interpretação.

Se na mecânica clássica podemos contar no máximo umas dez interpretações diferentes, no caso da física quântica essa contagem chega a em torno de cem! Eu já contei cinquenta interpretações, mas se me oferecessem um pote de sorvete premium de chocolate com pedaços de chocolate, creio que conseguiria fazer uma lista com uma centena!

Por que acontece isso com a física quântica? Em primeiro lugar, trata-se de uma teoria fundamental, uma teoria de como teorias modernas devem ser construídas ou, se quiserem, uma linguagem para tratar de fenômenos atômicos. Mas isso também é o caso da mecânica clássica. Em segundo lugar, trata-se de um campo de ponta da ciência moderna, um campo que está nos limites de nosso conhecimento, distante do cotidiano, sendo portanto difícil observar aspectos que estariam por trás das medições conseguidas em laboratório. Na mecânica clássica, é mais fácil estudar os detalhes dos objetos macroscópicos envolvidos nas pesquisas, e portanto é mais fácil refutar possíveis interpretações. Na física quântica, só muito raramente uma interpretação é refutada.

Um outro campo científico que está nos limites de nosso conhecimento e que apresenta várias interpretações é a cosmologia, ou a teoria do Universo e de seus limites. Há porém fatores diferentes agindo em cada caso, que seria o nosso terceiro ponto. Na física quântica, o próprio ato da observação afeta ou constrange o objeto sendo estudado, de forma que não há como observar o que acontece quando ninguém está medindo um sistema atômico. Um “realista”, então, pode especular à vontade sobre como é o mundo enquanto ninguém observa esse mundo (falarei mais sobre o realista abaixo). Já no caso da cosmologia, o problema não é que a observação afeta o observado, mas que não é possível fazer observações sobre coisas que estariam fora do nosso Universo.

Uma distinção básica (epistemológica) entre os diferentes tipos de interpretações é se elas são “realistas” ou “fenomenalistas”. Por fenomenalismo designamos a abordagem do cientista que não vai além daquilo que pode ser observado, que não especula sobre o que está por trás das aparências, e considera que o papel da ciência é descrever os fenômenos observados, e não buscar explicações a partir de causas ocultas. Esta abordagem é típica do movimento positivista e das abordagens instrumentalistas.

Já o realista científico defende que a ciência tem como alcançar as partes inobserváveis da realidade, não através da observação (é claro), mas através de inferências para a melhor explicação dos fenômenos. Por exemplo, Einstein defendeu que o espaço-tempo é curvo não porque isso possa ser diretamente observado (pois não pode), mas porque suas equações se simplificavam ao máximo.

Na classificação das interpretações, pode-se também fazer uma distinção (ontológica) entre as entidades básicas que constituiriam o mundo. Assim, no caso da teoria quântica, há interpretações que se baseiam apenas em partículas (corpúsculos) ou outras propriedades bem definidas. Há aquelas que vêem o mundo quântico como constituído apenas de ondas, ou de entidades difusas ou borradas. Há também aquelas que são dualistas, descrevendo o mundo com ambas as entidades (ondas e partículas). Por fim, há algumas interpretações que não adotam uma ontologia explícita (ênfatizando apenas a descrição matemática).

Há um terceiro eixo que é significativo para classificar as interpretações científicas, que é o aspecto “intencional” ou “emocional”, que as pessoas agregam às suas posições interpretativas. Há indivíduos que defendem ardentemente e até agressivamente uma interpretação, e o embate emocionalmente carregado envolvendo dois ou mais partidos pode resultar numa controvérsia científica. Há cientistas que apresentam idéias interpretativas novas, como as probabilidades negativas de Wigner, mas as consideram apenas como um instrumento útil de cálculo, e não como conceitos que descrevam aspectos da natureza.

Com essas distinções, proponho que se possam formar cinco grandes grupos de interpretações da teoria quântica (algumas já mencionadas no texto 16, “Interpretando o experimento da dupla fenda”):

(1) *Interpretação Ondulatória Realista*. Este ponto de vista considera que a função de onda quântica corresponde a uma realidade, uma realidade ondulatória, “borrada”, ou talvez uma “potencialidade”. Numa versão ingênua da interpretação ondulatória, a realidade que corresponde à função de onda sofreria colapsos toda vez que ela interage com um aparelho de medição. Um problema conceitual é que tais colapsos são “não-locais”, ou seja, envolvem efeitos que se propagam de maneira instantânea. A interpretação dos estados relativos de Everett (1957), a transacional de Cramer (1986), a da decoerência de Zeh (1993), e a das localizações espontâneas (Ghirardi et al., 1986) são outros exemplos de interpretações ondulatórias realistas.

(2) *Interpretação Corpuscular Realista*. Este é o ponto de vista segundo o qual as entidades microscópicas são partículas, sem uma onda associada. Esta posição foi defendida explicitamente por Landé (1965), dentro da “interpretação dos coletivos estatísticos”, que em sua versão realista também inclui Ballentine e Popper, entre outros. A grande dificuldade da abordagem corpuscular é explicar os padrões de interferência obtidos em experimentos com elétrons. Apesar deste problema não ter sido satisfatoriamente superado, é muito comum encontrarmos interpretações corpusculares na literatura. Interpretações que atribuem valores simultaneamente bem definidos para observáveis incompatíveis (como posição e momento), e que não introduzem grandezas “borradas”, são classificadas como “corpusculares”. A interpretação implícita ao se usar a Lógica Quântica seria um exemplo disso.

(3) *Interpretação Dualista Realista*. Esta interpretação foi formulada originalmente por Louis de Broglie, em sua teoria da “onda piloto”, e ampliada por David Bohm (1952) para incluir também o aparelho de medição. O objeto quântico se divide em duas partes: uma partícula com trajetória bem definida (mas em geral desconhecida), e uma onda associada (ou um “potencial quântico”). A probabilidade de a partícula se propagar em uma certa direção depende da amplitude da onda associada, de forma que em regiões onde as ondas se cancelam, não há partícula. No nível ingênuo de um curso introdutório, esta abordagem está livre do problema da não-localidade, tendo como única dificuldade conceitual a existência de “ondas vazias”, que não carregam energia. O problema da não-localidade só surge quando se consideram duas partículas correlacionadas, como foi demonstrado por John S. Bell.

(4) *Interpretação Dualista Fenomenalista*. Esta expressão designa especialmente a interpretação da complementaridade de Niels Bohr (1928), que reconhece uma limitação em nossa capacidade de representar a realidade microscópica. Conforme o experimento, podemos usar ou uma descrição corpuscular, ou uma ondulatória, mas nunca ambas ao mesmo tempo (esses aspectos excludentes, porém, “exauririam” a descrição do objeto). Isto não significa, porém, que o objeto quântico *seja* um corpúsculo ou *seja* uma onda. Segundo qualquer

abordagem fenomenalista (no contexto da física), só podemos afirmar a existência das entidades *observadas*. Afirmar, por exemplo, que “um elétron não-observado sofre um colapso” não teria sentido. Um fenômeno ondulatório se caracteriza pela medição de um padrão de interferência, e um corpuscular pela possibilidade de inferir (ou melhor, “retrodizer”) uma trajetória bem definida. O aspecto pontual de toda detecção (considerada pela interpretação 2 como a maior evidência da natureza corpuscular dos objetos quânticos), que ocorre mesmo em fenômenos ondulatórios, é considerado o princípio fundamental da teoria quântica, e chamado por Bohr de “postulado quântico”. Há diversas variações desta abordagem, constituindo as chamadas interpretações “ortodoxas”. Mais recentemente, podemos destacar a interpretação das histórias consistentes de R.B. Griffiths (1984) e Omnès (1992).

(5) *Interpretação Corpuscular Fenomenalista*. Há versões da interpretação dos coletivos estatísticos (mencionada no item 2) que são estritamente fenomenalistas, e consideram que não faz sentido afirmar nada a respeito do que acontece por trás dos fenômenos, que no caso da física quântica se manifestam como partículas. Esta posição “instrumentalista” é bastante difundida entre os físicos, e faz parte do conjunto de interpretações ortodoxas (junto com o item 4). Salienta-se que a teoria quântica apenas descreve o comportamento estatístico dos elétrons ou fótons, e que não faz sentido perguntar o que acontece para um quantum individual enquanto ele está se propagando (antes de ser medido). Essa visão aparece no trabalho inicial de Heisenberg (1927), e uma versão recente mais sofisticada é apresentada pelo físico israelense Asher Peres. Trata-se de um fenomenalismo mais radical do que o da interpretação da complementaridade, que ao menos aplica seus conceitos para detecções individuais.

Para finalizar, vale mencionar que não há interpretações ondulatórias fenomenalistas, já que as ondas quânticas não são observadas diretamente. O que mais se aproximaria disso seria a visão de John von Neumann (1932), que descrevia todos os objetos (incluindo aparelho de medição e até o observador humano) a partir de funções de onda, sem no entanto defender que essa descrição correspondesse à realidade.

36. A Interpretação da Localização Espontânea

Em 1986, o italiano Gian Carlo Ghirardi, e seus colegas Alberto Rimini & Tullio Weber, desenvolveram uma nova interpretação da mecânica quântica, que recebe o nome de “interpretação da localização espontânea”, ou simplesmente “GRW”. Trata-se de uma visão ondulatória realista, que considera que as entidades quânticas, como átomos individuais, são ondas reais, espalhadas no espaço tridimensional, mas que têm a peculiaridade de se colapsarem de vez em quando, ao acaso, passando de uma onda espalhada para um pacote de onda bem localizada.

A diferença com as interpretações ondulatórias tradicionais é que a redução (ou colapso) não é causada pela presença de um observador consciente ou pela interação com um aparelho macroscópico, mas é uma redução sem causa, uma redução espontânea, uma instabilidade intrínseca à natureza. A motivação para isso é buscar uma descrição objetiva do mundo quântico, que não dependa da presença ou ausência de um sujeito (ou seja, de um observador humano).

A probabilidade de ocorrência desta hipotética localização espontânea, em um segundo, para um “núcleon” (ou seja, um próton ou um nêutron, que são os constituintes do núcleo do átomo), seria de 1 localização para cada 10 quadrilhões (10^{16}) de núcleons. Esta é a quantidade de núcleons presente em uma amostra de 50 microgramas de silício, usado em finas placas de detectores de partículas, correspondendo grosso modo a uma área de detecção equivalente à área de um fino fio de cabelo humano (de espessura 40 micra, sendo que um micron é um milionésimo de metro). Ou seja, nesta amostra, as localizações ocorreriam uma vez por segundo, em média.

Além disso, GRW estipulam outro parâmetro fundamental (além do tempo de ocorrência de uma localização), que é a distância resultante de um colapso, correspondendo a 0,1 micra.

Um nêutron que se propaga sozinho pelo espaço, espalhando-se como onda por todo canto, teria uma probabilidade ínfima de sofrer um colapso espontâneo, e assim ele mantém sua “coerência”, comportando-se como onda. Porém, quando ele passa a interagir com uma placa detectora de silício, emaranhando-se com quintilhões de átomos da placa, a probabilidade de o sistema todo sofrer um colapso se torna altíssima. Isso explicaria porque objetos quânticos sofrem colapso durante o processo de medição, e não seria necessário invocar um sujeito observador.

Uma consequência desta interpretação é que não poderiam existir superposições macroscópicas, às vezes chamadas de “gatos de Schrödinger” (ver texto 9). A questão das superposições macroscópicas está ainda em aberto na física quântica.

Esta interpretação tende a concordar com as abordagens que envolvem a noção de “decoerência induzida pelo ambiente” (texto 21), só que ela não faz referência ao ambiente, e lida bem com colapsos individuais (ao contrário da abordagem da decoerência). Um preço pago, porém, é a introdução de duas novas constantes da natureza (como vimos acima).

No modelo de GRW, as localizações espontâneas estão associadas à massa presente (ou seja, ao número de núcleons), e isso faz com que a gravidade acabe sendo a responsável pela redução de estado, tese esta aventada pela primeira vez pelo húngaro Frigyes Károlyházy (1966). Em consequência, esta interpretação não atribui colapsos diretamente à luz (que não possui massa de repouso), mas apenas aos átomos que interagem com a luz nos detectores, formando os “fótons”.

Philip Pearle (1976) e Nicolas Gisin (1984) já desenvolviam estudos teóricos buscando descrever o processo de redução de estado por meio de um termo de correção da equação de Schrödinger, um termo não-linear “estocástico” (ou seja, aleatório). Com o advento da abordagem de GRW, Pearle uniu esforços com os italianos, vendo no trabalho deles um modelo físico concreto que fundamentaria o seu tratamento mais abstrato. O modelo resultante é conhecido como “localização espontânea contínua”.

Ghirardi e seu grupo aplicaram sua teoria para a situação em que um observador humano tem acesso visual a uma superposição quântica. Será que os cérebros humanos entrariam em superposição, como defende a interpretação dos muitos mundos (texto 22)? Está claro que não! Calculando a massa dos íons envolvidos na transmissão do sinal no nervo óptico, a partir da retina, Aicardi et al. (1991) concluíram que a superposição seria suprimida em menos de 0,01 segundos.

A exploração de novas interpretações da física quântica é ainda uma atividade marginal na física, e tal atividade também congrega matemáticos e filósofos da tradição analítica (que são fortes nos países de língua inglesa). Quem trabalha em fundamentos da física quântica precisa se unir. Além dos congressos, nota-se uma tendência de se formar núcleos em diferentes departamentos universitários. Defensores da interpretação das localizações espontâneas têm se unido aos partidários da mecânica bohmiana (texto 23), na Universidade de Rutgers, em Nova Jérsei.

37. A Ordem Implicada de David Bohm

No texto 23, “A Interpretação da Onda-Piloto”, apresentamos o importante trabalho do físico norte-americano David Bohm nos anos 1950, sobre os fundamentos da teoria quântica. Em torno de 1970, ele desenvolveu uma nova concepção, baseada na noção de “ordem implicada” ou “implícita”, que não teve o mesmo impacto que seu trabalho anterior, mas que salientou bem o aspecto holista do universo quântico, tendo influenciado as posteriores correntes do misticismo quântico.

Essa nova concepção de Bohm é apresentada na coletânea de textos “Totalidade e Ordem Implicada”, traduzida para o português em 1992 pela editora Cultrix, com uma nova tradução lançada em 2008 pela editora Madras (o original em inglês é de 1980).

A física clássica privilegia uma descrição da realidade física no espaço e no tempo, e com as teorias da relatividade consolidou-se a noção de que as ações dos corpos se propagam a uma velocidade finita (discutimos isso no texto 18, “Teorema de Bell para Crianças”). Isso sugere que, ao se descrever um sistema físico, se possa analisar o sistema em diferentes componentes separados.

Por exemplo, ao estudar o movimento dos corpos do sistema solar, pode-se ignorar a existência da galáxia de Andrômeda. Sabemos, porém, que a força exercida por esta galáxia é suficiente para fazer um corpo, na Terra, deslocar-se um micron (um milionésimo de metro) em uma hora. Tal efeito não é mensurável porque toda o sistema solar sofre a mesma aceleração, e há um ocililhão de estrelas exercendo suas forças sobre nós. Mas o fato é que, mesmo para a física clássica, não se pode, a rigor, isolar um sistema do resto do Universo. Na prática, porém, tal separação de uma parte não compromete os cálculos que são feitos, e pode-se então ignorar o resto do Universo ao se fazer um cálculo sobre o sistema solar.

A situação mudou com a física quântica, e os estados “emaranhados” de duas partículas, que podem levar ao fenômeno chamado “não-localidade”, vistos no texto 18 e também nos textos 26 (“Astrobigoaldo quer Informação Instantânea”) e 29 (“O Paradoxo de EPR”). Apesar de a questão de como interpretar a não-localidade ainda ser controvertida, há uma concordância de que a tentativa de descrever cada uma das partículas do par emaranhado, de maneira isolada, leva a um par de “estados mistos” separados que não descreve todas as propriedades mensuráveis do sistema, que podiam ser obtidas como o estado emaranhado original. Ou seja, não se pode analisar sistemas emaranhados a partir de partes espacialmente separadas.

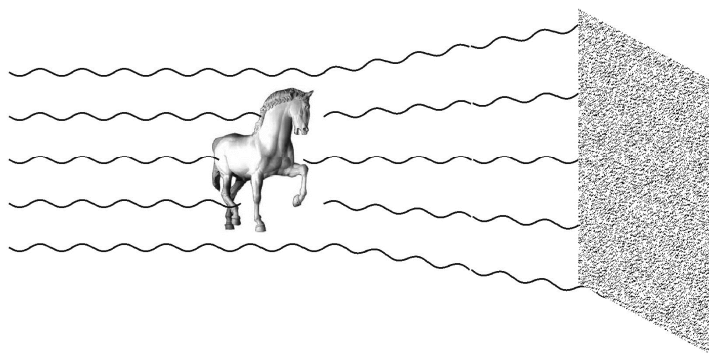
É por essa razão, então, que Bohm buscou construir uma nova abordagem para a ciência, partindo da concepção de um universo de totalidade indivisível. Esta concepção, por sinal, já

estava presente no livro “Quantum Theory” (pp. 139-40), de 1951. Na década de 70, cunhou novos termos, refinou e estendeu sua discussão.

A ordem tradicional da física clássica, baseada na distribuição dos eventos no espaço e tempo, que chamou de “ordem explícita” ou “desdobrada”, não seria a ordem fundamental. A ordem mais profunda, a partir da qual se explicitariam o espaço e o tempo, seria o que chamou de “ordem implicada” (em inglês: *implicate order*) ou “envolvida”. Assim, duas partículas emaranhadas teriam uma ligação ou dependência mútua que seria anterior ao espaço-tempo.

Na ordem implicada, um elemento pode se desdobrar em uma região extensa do Universo. Isso guarda semelhanças com o que ocorre na difração das ondas, exemplificada no experimento da dupla fenda com luz ou elétrons (ver texto 16, “Interpretando o Experimento da Fenda Dupla”). Neste experimento, o padrão contido em uma pequena região (as fendas) é projetado em uma grande região na tela. Tal transformação é descrita matematicamente por uma “transformada de Fourier”. Um aspecto interessante é que uma transformada da transformada gera de volta o padrão inicial (a menos de alguns detalhes).

A figura abaixo representa a transformada de uma pequena figura de cavalo. Notamos que a sombra formada numa parede distante não se parece em nada com um cavalo, mas toda a informação original está lá, transformada, “implícita” (o padrão do lado direito da figura foi gerado pelo físico Eduardo Khamis). Se uma pequena transparência for impressa com este padrão, e colocado no caminho de um feixe de luz, a figura resultante na parede terá a forma (bidimensional) do cavalo original, correspondendo assim a uma ordem “explícita”. Este fenômeno pode ser observado naquelas pequenas lanternas chinesas, de raio laser avermelhado, que projetam formas como a de um cavalo. Se olharmos com um pequeno microscópio para a máscara que é colocada na lanterna, ela parecerá um padrão de pontos aleatórios. Cada ponto na fenda é projetado na parede como um padrão de anéis concêntricos, e o padrão resultante acaba ficando parecido com um cavalo.



Bohm não faz uso desta analogia com a difração, mas com um fenômeno mais complexo conhecido como “holografia”, que discutiremos no próximo texto. Com isso, chegou à conclusão de que cada pequena região do espaço e do tempo contém implicitamente a ordem total do Universo. Tal afirmação nos faz lembrar do “aleph” de Jorge Luis Borges, uma pequena esfera perdida no porão de uma casa em Buenos Aires onde se podia ver todos os detalhes do Universo:

“Nesse instante gigantesco, vi milhões de atos agradáveis ou atrozes; nenhum me assombrou mais que o fato de todos ocuparem o mesmo ponto, sem superposição e sem transparência. O

que meus olhos viram foi simultâneo; o que transcreverei será sucessivo, pois a linguagem o é” (“O Aleph”, Editora Globo, 1978, p. 133).

Outra característica da visão de Bohm é o que ele chamou de “holomovimento”, que combina sua concepção holista do Universo indiviso com uma “ontologia de processos”, ao invés de uma ontologia de coisas. O termo filosófico “ontologia” se refere à questão sobre o que é feito o mundo, do que é constituído o mundo. O materialismo mecanicista, por exemplo, tende a ver o mundo como constituído de matéria (que seria sua ontologia básica) provida de movimento. Uma filosofia de processo coloca como mais fundamental o movimento, o fluxo, a mudança, e a partir desse processo emergiriam estruturas dinâmicas relativamente invariantes, que denominamos “coisas”. Ao longo da história, metafísicas de processo foram propostas por Heráclito, Whitehead, Bergson, Prigogine, entre muitos outros.

Outro aspecto interessante dessa concepção, presente também em sua teoria causal (de variáveis ocultas, ou da onda piloto) de 1952, é considerar que a realidade do Universo quântico é fundamentalmente multidimensional. Por exemplo, duas partículas emaranhadas corresponderiam a uma única entidade em 6 dimensões espaciais. O que vemos como duas partículas correlacionadas seriam projeções desta entidade única em dois eixos ortogonais, assim como um peixe em um aquário é visto de maneiras diferentes em lados ortogonais do aquário (por exemplo, em um lado o vemos de frente e de outro o vemos de lado). Tal ideia já tinha sido discutida por Max Born no Congresso de Solvay de 1927, mas Bohm é um dos poucos a defendê-la explicitamente.

A interpretação do holomovimento de Bohm busca fornecer um arcabouço geral para que se desenvolva uma nova abordagem para a física, mas ela não apresenta descrições mais detalhadas de fenômenos quânticos. Bohm, em colaboração com Basil Hiley e outros, explorou o uso de certas álgebras para exprimir como seriam as leis do “pré-espaco”, mas os resultados obtidos não foram muito relevantes.

Bohm especulou também que a ordem implicada se aplicaria tanto para a matéria quanto para a consciência. Utilizou a teoria do neurologista Karl Pribram, que também se inspirou na holografia, e que examinaremos no texto 39. A visão geral de Bohm parece se aproximar daquela defendida no séc. XVII pelo filósofo holandês Spinoza: matéria, vida, consciência seriam algumas “projeções” de uma totalidade multidimensional única.

38. As Origens Hippie do Misticismo Quântico

O historiador da ciência David Kaiser tem estudado as origens do misticismo quântico na década de 1970, um período em que a física norte-americana enfrentava dificuldades financeiras devidas à crise do petróleo. Com vários recém-doutores em física desempregados, alguns se voltavam para o estudo dos fundamentos teóricos da física e alguns para a possível conexão entre a física e os poderes da mente.

Como todos sabem, a cultura norte-americana no início da década de 70 foi marcada pelos desdobramentos do movimento hippie, que surgiu especialmente no norte da Califórnia, com a disseminação do uso de drogas psicodélicas e a vivência de novos valores culturais. Um aspecto deste movimento contestatório foi uma rejeição da ciência tradicional e revalorização de tradições místicas antigas, incluindo a parapsicologia. A “contracultura” deste período

tinha uma marcada tendência anticientífica, conforme enfatizado por autores como Theodore Roszak, em *A Contracultura* (Vozes, 1972), mas Kaiser salienta que certas áreas científicas despertavam sim o interesse dos jovens universitários, e dentre elas estava a física quântica.

Naquela época, o mágico israelita Uri Geller descobrira um filão para enriquecer: vender as suas habilidades ilusionistas, que incluíam entortar colheres e fazer relógios pararem, como se fossem fruto de extraordinários poderes da mente. Até hoje muitos acreditam na veracidade dos poderes de Geller, apesar de seus truques terem sido desvendados por um outro mágico, o cético-científico James Randy, que afirmou, por sinal, que os físicos são as piores pessoas para investigar os fenômenos paranormais, pois seriam muito crédulos para perceber os detalhes dos truques e muito arrogantes para admitir seus próprios erros. De qualquer forma, disseminava-se o interesse em parapsicologia, e alguns físicos começaram a investigar a possibilidade de explicar cientificamente os fenômenos paranormais, como a telepatia, a premonição, a percepção extrasensorial e a psicocinese (alterar objetos apenas com a mente).

Antes de prosseguir, devo salientar que estou tirando a maior parte do material deste texto de uma palestra dada por Kaiser em 2007, cujo vídeo e transcrição se encontram no seguinte site: <http://osulibrary.oregonstate.edu/specialcollections/events/2007paulingconference/video-s1-4-kaiser.html>. Kaiser, que trabalha no MIT (pronuncia-se e-mai-tí), perto de Boston, está preparando um livro sobre as origens do misticismo quântico deste período, que vai se chamar *Como os Hippies Salvaram a Física*, a ser lançado no final deste ano de 2010. Enquanto o livro não sai, vou adiantando aos internautas de língua portuguesa o que já está disponível sobre este interessante assunto.

Nos anos 70, vários físicos começaram a trabalhar na conexão entre mecânica quântica e misticismo. Em Londres, David Bohm, que estava desenvolvendo sua concepção do holomovimento e da ordem implicada (ver texto 37), interessou-se pelos poderes de Uri Geller. Paralelamente, começou a dialogar com o misticismo oriental, em especial com Krishnamurti, resultando em vários diálogos publicados em livros e disponíveis no Youtube.

Mas foi no norte da Califórnia que se concentrou o grosso da pesquisa sobre o misticismo quântico. As Forças Armadas norte-americanas investiram muito dinheiro em estudos parapsicológicos, na esperança de desvendarem segredos militares da União Soviética através da chamada “visão remota”. Este programa tornou-se público em 1995, com a desclassificação de documentos da Guerra Fria, e é conhecido pelo nome Projeto Stargate. Na Stanford University, dois físicos experimentais importantes lideraram a pesquisa em parapsicologia, tendo já recebido financiamento dos militares por sua pesquisa com lasers. Esses dois físicos eram Harold Puthoff e Russell Targ, e eles convidaram Geller e outros para se submeterem a testes, e se impressionaram com os resultados. Publicaram um artigo na *Nature* e em outros periódicos, sugerindo que a física quântica poderia explicar os poderes da mente demonstrados pelo mágico israelita e pelos outros videntes. Suas pesquisas foram resumidas no livro *Mind-Reach* (1977), recentemente relançado.

Na Universidade de Berkeley, também localizado na região da Baía de San Francisco (“the Bay Area”), surgiu um primeiro grupo de discussão envolvendo físicos, que discutia as possíveis conexões entre a física quântica e a paranormalidade. O grupo se intitulava “Grupo de Física Fundamental”, e contava com físicos respeitáveis como Henry Stapp, Phillippe Eberhard, Hans-Dieter Zeh, Geoffrey Chew, Fritjof Capra, John Clauser, Nick Herbert, Fred Alan Wolf, além de não-cientistas contactados por Elizabeth Rauscher. A atividade principal do grupo era discutir o teorema de Bell e suas consequências. Em 1972, Clauser e seu colega

Stuart Freedman foram um dos primeiros a comprovar experimentalmente o teorema de Bell, em Berkeley (ver texto 18).

Um dos temas discutidos pelo grupo era a possibilidade de se transmitir informação instantaneamente através de pares correlacionados de Bell. Já mencionamos, no texto 26, que isso não é possível, e um dos primeiros a demonstrar isso (segundo a teoria quântica) foi Eberhard (1978). Nick Herbert, que escreveu um livro de divulgação muito bom, traduzido para o português como *A Realidade Quântica* (Ed. Francisco Alves), propusera um possível mecanismo de transmissão instantânea de informação, a partir da possibilidade de amplificar (“clonar”) sem ruído um estado quântico. Diversos físicos, dentre eles Roy Glauber, mostraram que isso é impossível, pois a amplificação sempre introduz ruído. Herbert acabou se mudando para a cidadezinha de Boulder Creek, onde fundou um grupo chamado “CORE Physics Technologium”, e desenvolveu o Tantra Quântico – conhecimento cósmico através da experiência sexual, fusão do ioga tântrico e do misticismo quântico.

O personagem principal do grupo original de Berkeley era Henry Stapp, que com Eberhard defendia que o teorema de Bell se aplicaria também para a interpretação da complementaridade de Niels Bohr (texto 10). Essa extensão do teorema de Bell, que envolvia referência a medições não realizadas (ou seja, “medições contrafactuais”, que também estavam presentes no paradoxo de EPR, que vimos no texto 29), acabou não sendo aceita pela comunidade de físicos e filósofos. Pode-se especular que o misticismo presente em Stapp, desde a época em que foi trabalhar com Wolfgang Pauli na Suíça, no final dos anos 50, o estimulou a buscar generalizar o teorema de Bell para situações envolvendo mentes emaranhadas. Nos anos 90, Stapp se tornou o mais respeitado defensor do misticismo quântico (junto com o mais comedido Roger Penrose), publicando o livro *Mind, Matter and Quantum Mechanics* (1993), apesar de ele nunca ver com simpatia as analogias com as filosofias orientais. Em 2007 lançou *Mindful Universe*, que pode ser traduzido como uma superposição de “universo cheio de mente” e “universo pensante”.

Um dos participantes do grupo, o físico teórico Jack Sarfatti, acompanhava de perto a pesquisa de Puthoff & Targ sobre a paranormalidade, e defendia a ligação desta com a física quântica, em revistas como a *Science News*. Sarfatti fundou um outro grupo, que chamou “Grupo de Pesquisa em Consciência Física”, com o escritor místico Michael Murphy, co-fundador do famoso Instituto Esalen, localizado nos penhascos de Big Sur, onde jorram termas de águas quentes. Entre 1976 e 85, os encontros do Grupo de Física Fundamental passaram a se realizar em Esalen, na forma de workshops.

Sarfatti travou contato com o controvertido Werner Erhard, que ganhara milhões de dólares ao fundar o programa de auto-ajuda “est” (Erhard seminar training – que envolvia as pessoas em um tratamento de choque), e passou a financiar a pesquisa em física mística. Erhard está agora foragido dos Estados Unidos, devido à evasão de impostos, e sua organização é hoje chamada Forum Landmark. Outro financiador das discussões místicas científicas dos anos 70 foi o Institute for Noetic Studies, fundado pelo astronauta Edwin Mitchell, após ter uma experiência mística na órbita lunar. Hoje em dia, o maior financiador de pesquisa na interface ciência-religiosidade-parapsicologia é a Templeton Foundation.

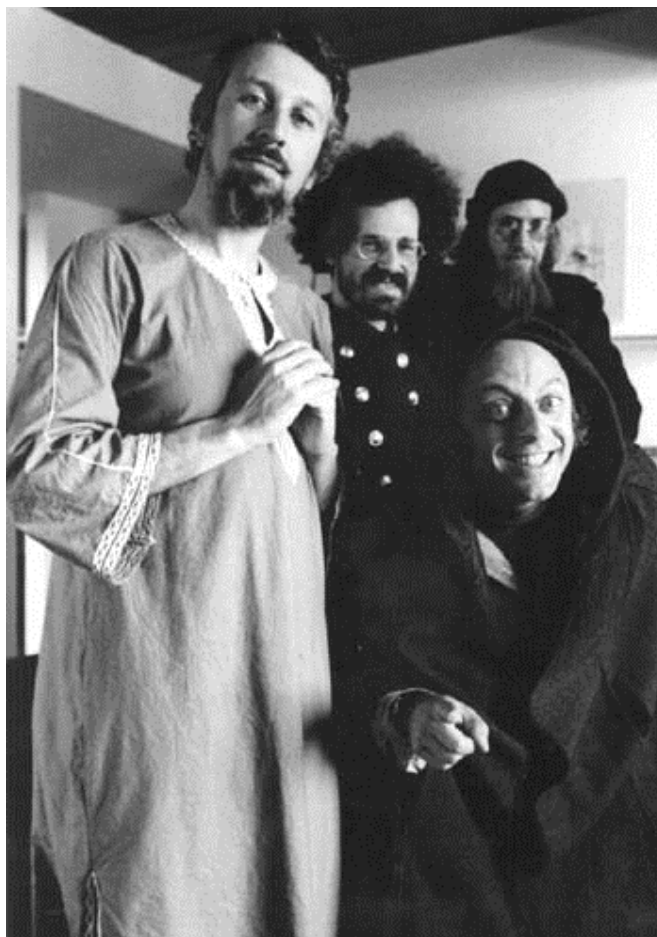


Figura: Da esquerda para a direita, os físicos Jack Sarfatti, Saul-Paul Sirag, Nick Herbert (ao fundo) e Fred Alan Wolf, em 1974, apelidados de Ghostbusters, pois teriam inspirado o filme de Dan Akroyd.

Vários livros de divulgação do misticismo quântico surgiram neste ambiente. O mais conhecido talvez seja *O Tao da Física*, do físico austríaco Fritjof Capra, publicado em 1975 e traduzido pela Cultrix, com prefácio do grande físico brasileiro Mário Schenberg, ele também um místico. O livro traça paralelos entre a física moderna e o misticismo oriental. Uma das teorias físicas consideradas, a teoria do “bootstrap” de Chew, membro do grupo de Berkeley, acabaria sendo abandonada pela comunidade científica. Na 2ª edição, lançada em 1983, Capra incluiu uma discussão do teorema de Bell. Ao ganhar projeção, Capra passou a conduzir seus próprios workshops em Esalen. Em 1990, seu irmão Bernt Capra dirigiu o filme *O Ponto de Mutação* (*Mindwalk*), inspirado em suas ideias.

Outro livro de sucesso foi o *The Dancing Wu Li Masters*, de Gary Zukav, que participou de um workshop em Esalen e resolveu escrever o livro, apoiando-se bastante em Henry Stapp. Outro livro, mais radical em sua defesa da parapsicologia e na busca de explicações físicas para a levitação, etc., foi publicado em 1975 por Fred Wolf, em colaboração com Bob Toben e com consultoria de Sarfatti, fartamente ilustrado e traduzido pela Cultrix com o título *Espaço-Tempo e Além*.

O historiador Kaiser se surpreendeu ao perceber que, nessa época de vacas magras da ciência norte-americana do início da década de 70, a grande maioria dos artigos científicos norte-americanos que discutiam o teorema de Bell vinha dos participantes desses grupos. Como o teorema de Bell viria a ganhar muita importância, e é hoje a base de toda área da informação quântica (ver texto 27), Kaiser conclui que esses hippies teriam “salvo a física americana”, o que é claramente um exagero.

39. O Universo Holográfico

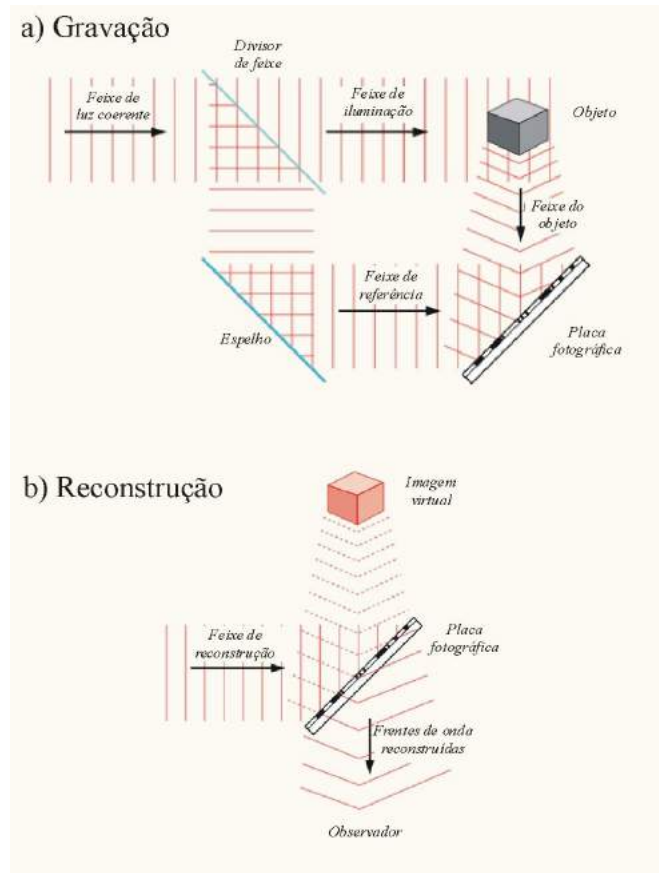
Em meados da década de 1980, consolidou-se uma nova perspectiva ao misticismo científico, conhecida como o “paradigma holográfico”, divulgado especialmente por dois livros. Em 1982, o psicólogo Ken Wilber editou a coletânea *O Paradigma Holográfico e Outros Paradoxos* (traduzido pela Cultrix em 1991), e em 1991 Michael Talbot (falecido precocemente em 1992) publicou *O Universo Holográfico* (traduzido pela Editora Best Seller, 1992). Mais recentemente, foi lançado um pequeno filme intitulado *O Universo Holográfico*, seguindo o estilo do *Quem Somos Nós?*, e disponível na internet: <http://video.google.com/videoplay?docid=8143461915008673259#>

O experimento físico tomado por essa perspectiva mística como a chave para os mistérios do Universo é a holografia. A inspiração desta abordagem vem de duas fontes. Por um lado, o físico David Bohm defendia, na década de 1970, uma nova interpretação da teoria quântica baseada na noção de “holomovimento” (ver o texto 37, “A Ordem Implicada de David Bohm”). Por outro lado, o psicólogo austríaco Karl Pribram apresentou, nessa mesma época, sua teoria “holonômica” do cérebro, que propunha que o processamento de informação no cérebro é semelhante à holografia.

A holografia é uma técnica de armazenamento de informação desenvolvida pelo físico húngaro Dennis Gabor em 1947, e que lhe rendeu o prêmio Nobel de Física de 1971. Não é fácil explicar seu funcionamento, então me basearei numa figura, adaptada da Wikipédia. Uma maneira de gravar um holograma é utilizar um feixe de luz coerente, como um raio laser, e dividir o feixe em dois componentes. O primeiro deles incide em um objeto tridimensional, e é refletido em direção a uma placa fotográfica. O segundo componente do feixe serve como “referência”, e interfere com o primeiro na chapa fotográfica.

Após revelar a placa fotográfica, obtém-se o holograma. Para reconstruir a imagem do objeto, basta lançar sobre o holograma um feixe de reconstrução semelhante ao feixe de referência original. Com, isso, o observador tem a ilusão de ver o objeto, sob um certo ângulo. Se o observador se movimenta, a imagem aparece sob nova perspectiva, criando a nítida impressão de um objeto tridimensional.

Para se ver como aparece a imagem tridimensional da holografia, pode-se consultar diversos vídeos na internet, como o seguinte: <http://www.youtube.com/watch?v=Ss0ttMRGg8>



Cada ponto do filme holográfico recebe luz de todos os pontos do objeto (e também do feixe de referência). Nesse sentido, cada pequena região do filme bidimensional contém informação do objeto tridimensional como um todo, visto de uma certa perspectiva. Se um pedacinho do holograma for cortado, ainda sim se poderá ver a imagem completa do objeto no pedacinho (mesmo havendo perda de nitidez). É nesse sentido que “o todo está contido em cada parte”, como no Aleph discutido no texto 37.

A ideia desenvolvida pelo psicólogo Pribram, a partir de 1966, é que a informação armazenada em nosso cérebro se organiza de maneira semelhante a um holograma, ou, de maneira mais simples, em camadas relacionadas por uma transformação semelhante à “transformada de Fourier” mencionada no texto 37, que transforma um pequeno objeto (ou um conjunto de fendas) em uma complexa imagem na tela. Assim, em uma certa camada do cérebro, uma minúscula região estaria conectada a uma extensa região de outra camada (por exemplo, da retina). Segundo a teoria de Pribram, nosso acesso à memória e mesmo nossa consciência surgiriam de um processo semelhante à reconstrução de um holograma. Porém, não haveria um observador privilegiado que “visse” a imagem reconstruída: o próprio processo de reconstrução equivaleria à nossa experiência subjetiva. Desta maneira, Pribram explicava experimentos em que uma grande parcela do cérebro de camundongos eram extirpada, e eles ainda conservavam o grosso de sua memória. Detalhes desta teoria holonômica são apresentados no seu livro *Languages of the Brain*, de 1977.

A reunião das concepções de Bohm e Pribram levou ao “paradigma holográfico”, que Talbot resumiu da seguinte maneira:

“Nosso cérebro constrói matematicamente a realidade objetiva ao interpretar frequências que são, na verdade, projeções provenientes de uma outra dimensão, de uma ordem mais profunda de existência, que está além tanto do tempo como do espaço. O cérebro é um holograma envolvido num universo holográfico” (Talbot, 1992, p. 79).

Após apresentar as interessantes concepções de Bohm e Pribram, Talbot passa a interpretar um grande número de alegações parapsicológicas em termos do paradigma holográfico. Isso inclui alegações de psicocinese em experimentos quânticos (Jahn & Dunne, 1987), de transmissão de pensamento durante o sonho (M. Ullman, 1987), de curas milagrosas de câncer por meio de técnicas de mentalização (C. Simonton, 1980) e de milagres religiosos como o surgimento de estigmas e a liquefação do sangue de São Januário. É desnecessário dizer que tais alegações não são aceitas pela ciência estabelecida, constituindo assim um misticismo “desafiador” da ciência (ver texto 11, “O Dilma do Místico”).

Um misticismo holográfico mais “conciliador” com a ciência poderia defender o holismo – de que todas as coisas do Universo estão interligadas – e poderia defender que há níveis de realidade mais fundamentais, e mesmo que o mundo que percebemos como ordenado no espaço e no tempo é apenas uma ilusão ou construção mental (idealismo subjetivista). Mas uma postura conciliadora não sustentaria a veracidade dos relatos de milagres e da maioria dos relatos parapsicológicos, como faz Talbot e boa parte dos místicos quânticos.

A questão da parapsicologia e da chamada “pseudociência” é polêmica, e suscita tanta carga emotiva quanto discussões religiosas. Não pretendo aqui estabelecer a verdade sobre esta questão, mas apenas ressaltar que a questão é fundamental no debate do misticismo científico, e não pode ser simplesmente deixada de lado em nossas discussões. Se nossa educação científica (nas escolas) fosse menos voltada para a memorização de fórmulas, definições e métodos, e mais voltada para como a ciência pode contribuir positivamente para o desenvolvimento de um cidadão com espírito crítico, certamente o debate sobre a pseudociência teria maior destaque no Ensino Médio, mesmo que conclusões definitivas não fossem estabelecidas.

Vale ressaltar, também, que as partes principais tanto a teoria holográfica de Bohm quanto a de Pribram podem ser aceitas por uma pessoa não-mística, por exemplo um materialista. O que este recusaria seria apenas a afirmação de que a mentalidade holográfica pudesse se estender para além do corpo humano, mesmo aceitando a existência de uma ordem implicada subjacente ao mundo físico.

Voltando agora para o misticismo holográfico, quer desafiador ou conciliador com a ciência estabelecida, devemos salientar que toda essa discussão tem sido incorporada pelos seguidores da psicologia de Carl Jung, que vêem no “inconsciente coletivo” uma manifestação da ordem implicada que se tornaria explícita nas manifestações culturais e psicológicas (incluindo os sonhos) dos diferentes povos humanos. Nessa direção, Talbot dá destaque para Stanislav Grof, psiquiatra que tratava seus pacientes usando LSD, e que explica os estados alterados de consciência e seu alegado acesso ao inconsciente coletivo e a vidas passadas por meio do paradigma holográfico. Grof participou da criação do movimento da “psicologia transpessoal” juntamente com Abraham Maslow, Wilber e outros, no início dos anos 1970, que explora a dimensão espiritual da psicologia humana, ou seja, aquela que transcenderia os limites do indivíduo.

O interesse pelo paradigma holográfico parece ter aumentado nos últimos anos devido ao surgimento de uma nova ideia na cosmologia, conhecida como “princípio holográfico”. Essa ideia surgiu com o ganhador do prêmio Nobel holandês Gerardus ‘t Hooft (1993), em seus estudos sobre buracos negros, e foi desenvolvida por Leonard Susskind, no contexto da teoria das supercordas. Um buraco negro surge do colapso gravitacional de uma grande estrela, e possui uma densidade tão grande que nem a luz consegue escapar da sua atração gravitacional. Uma grandeza física conhecida como “entropia”, no caso de um buraco negro, é proporcional ao quadrado do raio do buraco, e não a este raio elevado ao cubo, como seria de se esperar se a entropia estivesse relacionada com a informação espalhada pelo volume do espaço (como no caso de objetos físicos usuais). A ideia então é que toda a física tridimensional de um buraco negro poderia se reduzir às duas dimensões de sua superfície. O argentino Juan Maldacena, que escreveu um artigo de divulgação sobre o assunto no *Scientific American Brasil* de dezembro de 2005, desenvolveu (entre outros físicos) tais conceitos para o Universo como um todo.

Em outro artigo de divulgação da *Scientific American Brasil* (de setembro de 2003), disponível em inglês no sítio http://community.livejournal.com/ref_sciam/1190.html, o mexicano-israelense Jacob Bekenstein concluiu da seguinte maneira:

“Este resultado significa que duas teorias ostensivamente muito diferentes – que nem atuam em espaços de mesma dimensão – são equivalentes. Criaturas que vivem em um desses universos seriam incapazes de determinar se eles habitam um universo de 5 dimensões, descrito pela teoria das cordas, ou um de 4 dimensões, descrito por uma teoria quântica de campos para partículas pontuais”.

40. O Vácuo Quântico

O que acontece quando toda matéria é evacuada de um recipiente? É possível atingir o vazio absoluto, ou a natureza tem horror ao vácuo? Essa discussão se iniciou na Grécia Antiga: de um lado, atomistas como Demócrito defendiam que havia espaço totalmente vazio de matéria, enquanto do outro Aristóteles argumentava que não. No século XVII, René Descartes concebia o Universo como um “pleno”, ou seja, sem espaços vazios, mas outros filósofos da natureza já começavam a produzir o vácuo. Em 1643, o italiano Evangelista Torricelli encheu um longo tubo (selado em uma das pontas) com mercúrio, tapou-o, virou-o e o colocou num banho de mercúrio, retirando a tampa, como na figura abaixo (retirado da Wikipedia, que tem um bom artigo em inglês sobre o assunto). A coluna de mercúrio desceu do ponto A para C, atingindo uma altura de 76 cm. Três anos depois, o francês Blaise Pascal mostrou que essa altura de mercúrio exerce uma pressão no banho de mercúrio que é igual à pressão atmosférica, confirmando que o espaço entre A e C é vazio! Em 1654, Otto von Guericke construiu a primeira bomba de vácuo, e desde então a qualidade das bombas vem melhorando progressivamente.



Para se ter uma idéia da qualidade dos vácuos, vamos contar quantas moléculas de um gás estão contidas em um centímetro cúbico (cm^3) de uma certa região evacuada. O ar que a gente respira tem em torno de 30 quintilhões de moléculas por cm^3 (um quintilhão é o dígito 1 seguido de 15 zeros). A melhor garrafa térmica já construída possui duas paredes separadas por um vácuo com aproximadamente um trilhão de moléculas por cm^3 . O recorde atingido em uma câmara de vácuo na Terra é de apenas 100 mil moléculas por cm^3 , o que equivale à situação na superfície da Lua. Muito vazio!

Mas isso é uma multidão perto do que existe no espaço sideral. Entre os planetas há uma “densidade de número” de 10 moléculas por cm^3 . Entre as estrelas de uma galáxia, 1 molécula por cm^3 . Parece pouco, mas no espaço entre as galáxias há em média somente 1 molécula por metro cúbico!

Se pudéssemos lançar um vidrinho de perfume vazio para longe de nossa galáxia (chamada Via Láctea), tapá-lo hermeticamente, e trazê-lo de volta, teríamos uma boa chance de não termos nenhuma molécula dentro da garrafa! Teríamos assim o vácuo absoluto, com pressão zero! E agora, o que haveria dentro do vidrinho? Nada?

Nada disso! À temperatura ambiente, as paredes do vidrinho emitem radiação eletromagnética infravermelha, que permeia o interior do vidro. Se decidíssemos jogar o vidrinho de volta para o espaço intergaláctico, mesmo assim haveria a chamada “radiação de fundo do Universo”, uma radiação eletromagnética remanescente do Big Bang (o início do Universo), associada a uma temperatura de 3 kelvin (ao invés dos 300 kelvin na superfície da Terra), na faixa de micro-ondas. E haveria também a radiação provinda das estrelas, a gravidade das estrelas, e os neutrinos que estão por toda parte.

Mas poderíamos talvez isolar o vidrinho de toda radiação eletromagnética, e abaixar a temperatura para próximo do zero absoluto. E aí? Teríamos nada?

Plenamente não! O espaço vazio está sujeito a flutuações quânticas! Ele contém uma energia residual, mesmo numa temperatura de zero absoluto, descrita pela primeira vez por Albert Einstein & Otto Stern em 1913, e que recebe o nome de “energia de ponto zero”.

Em 1930, o físico inglês Paul Dirac estava tentando entender as equações que havia obtido para o elétron, ao juntar mecânica quântica e teoria da relatividade restrita. Imaginou que haveria um mar de elétrons, e que a situação correspondente ao vácuo seria um mar calmo, com todos os elétrons abaixo da superfície do mar. Porém, poderia acontecer de um elétron ganhar energia e pular para fora do mar, como uma gotinha de água que às vezes sai voando. Neste caso, ficaria um buraco no mar, e este buraco acabou sendo interpretado como a “antipartícula” do elétron, o chamado “pósitron” (que tem todas as propriedades idênticas às do elétron, a menos da carga elétrica). Esse modelo visual simples daria conta, então, do surgimento de um par elétron-pósitron a partir de energia (por exemplo, radiação eletromagnética na forma de raio gama). O processo inverso, a aniquilação de um elétron por um pósitron (resultando em um par de fótons de raio gama), corresponderia, no modelo de Dirac, ao retorno da gotinha de água para dentro do mar.

Na década de 1930, tentou-se conciliar a teoria da relatividade com a teoria quântica de campos (indo além do que conseguira Dirac), e uma das chaves para conseguir isso foi perceber que o vácuo quântico podia ser “polarizado”, como se fosse um fluido dielétrico. Com a consolidação desta teoria da “eletrodinâmica quântica” por Tomonaga, Schwinger, Feynman e Dyson, após a 2ª Guerra Mundial, o conceito de vácuo quântico passou a ser parte integrante do nosso retrato do Universo.

Na alegoria do mar de Dirac, então, o mar deve ser visualizado como uma superfície com pequenas mas constantes ondinhas, com uma energia de ponto zero. As flutuações do vácuo são análogas às flutuações na superfície do mar, e há sempre a possibilidade de partículas materiais serem criadas a partir dessas flutuações, como gotinhas de água que pulam para fora, deixando um buraco dentro d’água.

Em 1948, Hendrik Casimir previu um fascinante efeito cuja explicação envolve o conceito de vácuo quântico. O efeito envolve duas placas perfeitamente condutoras (mas sem carga elétrica) que são colocadas próximas e paralelas. A previsão é que haverá uma atração entre as placas, bem maior do que a atração gravitacional. A explicação é que a cavidade criada entre as placas suprime certas frequências de oscilação do vácuo, de forma que a pressão que o vácuo externo exerce sobre as placas acaba se tornando maior do que a pressão interna (onde certas ondas foram eliminadas pelas placas). Em 1997, Steven Lamoreaux confirmou experimentalmente o efeito Casimir. Tal efeito é hoje um problema para a construção de dispositivos de nanotecnologia.

O primeiro efeito explicado pela eletrodinâmica quântica, a partir da noção de vácuo quântico, foi o chamado “deslocamento de Lamb” em raios espectrais de átomos (1947). Outro fenômeno que é parcialmente explicado pelo vácuo eletromagnético é a força intermolecular de van der Waals. As flutuações do vácuo podem ser vistas também como as causas do decaimento espontâneo de elétrons em átomos.

A energia contida no vácuo parece estar associada à “energia escura” prevista pelas teorias cosmológicas atuais. Tal energia se manifestaria em uma “constante cosmológica” na teoria da relatividade geral, e explicaria porque a expansão do Universo é acelerada.

Discute-se também se seria possível extrair energia do vácuo para fins humanos, mas o consenso entre a maioria dos cientistas é que isso não é possível.

No final das contas, quem tinha razão entre os pensadores antigos? Os “vacuístas” (atomistas) ou os “plenistas”? Como geralmente acontece em controvérsias filosóficas que acabam sendo resolvidas pela ciência, ambos acertaram parcialmente. Os vacuístas tinham razão em poder pensar um espaço sem moléculas, mas os plenistas talvez tenham ganho o debate, já que mesmo o espaço sem átomos é carregado de energia, e de partículas em potencial.

41. Pauli, Jung e a Sincronicidade

Wolfgang Pauli (1900-58) foi um dos físicos que participaram ativamente da formulação da mecânica quântica, em 1926. Nascido em Viena, trabalhava como professor em Hamburgo quando descobriu em 1924 o princípio de exclusão dos elétrons (dois elétrons nunca ocupam o mesmo estado no átomo), o que lhe renderia o Prêmio Nobel de 1945. Foi Pauli quem propôs em 1930 a existência de uma nova partícula, o neutrino (detectada em 1956). Dois outros resultados teóricos importantes foram a conexão entre spin e estatística (1940) e a simetria CPT envolvendo carga, paridade e tempo (1954).



Pauli era um físico matemático muito rigoroso, e um severo crítico do trabalho de seus colegas. Ele tinha uma personalidade complicada, misturando inteligência, agressividade e humor, recebendo por isso apelidos como “Mefistófeles”, “o chicote de Deus” e “a consciência da física”. Desde jovem era colega de Werner Heisenberg, mas enquanto este gostava de fazer caminhadas nas montanhas com seus amigos do Movimento da Juventude, Pauli gostava da vida noturna, em companhia da bebida e de mulheres, e frequentemente se metia em brigas. Seu pai abandonou sua mãe e esta se suicidou, o que o deixou mais perturbado, com ódio do pai, sem no entanto afetar sua produção científica. Na figura abaixo, Pauli é desenhado como Mefistófeles (o diabo) pelo físico George Gamow.



Em 1928, foi contratado na Politécnica de Zurique (ETH), na Suíça, e acabou se casando com uma bonita dançarina de cabaré. Em menos de um ano o casamento afundou e ela o trocou

por um professor de química. Em 1932, deprimido, Pauli resolveu se submeter à psicanálise, e procurou um renomado discípulo de Freud que residia em Zurique: Carl Jung.

De início, Jung o encaminhou para uma psicanalista mulher, Erna Rosenbaum, que ajudou Pauli por cinco meses, mas depois ela foi embora da cidade, e Pauli começou a se encontrar com Jung. Iniciou-se um diálogo que perduraria por um quarto de século. Nesse meio tempo, casou-se novamente, com Franca Bertram, e manteve um relacionamento estável até o fim da vida, encontrando enfim o equilíbrio desejado.

Um dos livros que trata do diálogo entre Pauli e Jung, e que usei como base para o presente texto, foi escrito pelo historiador e filósofo da ciência Arthur I. Miller, e se chama *Deciphering the cosmic number: The strange friendship of Wolfgang Pauli and Carl Jung* (W.W. Norton, Nova Iorque, 2009).

A base do método psicanalítico de Jung era a análise de sonhos, e Pauli anotou centenas de sonhos, que eram analisados a partir da concepção junguiana de que o tratamento envolve um processo de “individualização” em que as quatro funções da consciência – pensamento, sentimento, sensação e intuição – devem ser equilibradas e integradas. Um aspecto do método de Jung é relacionar os conteúdos dos sonhos com símbolos que apareceram na história cultural da humanidade, e que estariam incorporados em um “inconsciente coletivo”, ao qual todos nós teríamos acesso, e que estaria por trás dos fenômenos de “sincronicidade”.

A “sincronicidade”, para Jung, seriam coincidências que aconteceriam não por acaso (como diria um materialista), mas de maneira significativa, com um propósito. Um célebre exemplo é o de uma paciente de Jung que sonhara com um escaravelho. Enquanto ela relatava o sonho, Jung ouviu um barulho na janela: ao abrir, entrou um escaravelho na sala. Para Jung, isso não foi mero acaso. A coincidência deixou a paciente perplexa, e seu lado excessivamente racional cedeu, permitindo que ela encontrasse o caminho para a renovação psíquica. Na antiga mitologia egípcia, o escaravelho era símbolo de renascimento. Este então seria um exemplo de sincronicidade, uma coincidência significativa.

Essa concepção mística não é aceita entre os cientistas de mentalidade mais materialista, incluindo Freud. Mas, para Pauli, a concepção de Jung fazia sentido, e ele a esposou, apesar de esconder esse seu interesse de seus colegas universitários. Pauli via a verdade como um caminho estreito entre os dois perigos do “nevoeiro do misticismo” e do “racionalismo estéril”. E a chave para este caminho estaria relacionada com o princípio de complementaridade, proposto por Niels Bohr (ver texto 10, “O Yin-Yang da Complementaridade”), que equilibraria duas tendências da humanidade, o racionalismo ocidental e o misticismo oriental. Segundo Pauli, a irracionalidade (manifesta nos sonhos e no inconsciente coletivo) e a racionalidade seriam aspectos complementares da unidade do pensamento. Para ele, a ciência materialista representada pela física quântica não poderia ser uma descrição completa da realidade, pois ela deixa de fora todo o fenômeno da consciência humana. A realidade teria dois lados: o físico e o psíquico, o quantitativo e o qualitativo. Em 1957, escreveu que, em sua opinião, “a realidade última não é pessoal”, ao contrário da crença das religiões monoteístas, compartilhando assim do “misticismo” que encontrou no vedanta, no taoísmo, no budismo e no Ain Soph da cabala.

É curioso que a noção de sincronicidade dava um certo sentido ao mito conhecido como “efeito Pauli”. Esse mito surgiu quando Pauli era um jovem professor, e dizia que toda vez que ele passava perto de um laboratório, algum equipamento quebrava. Em seu livro, Miller

reúne várias histórias dessas coincidências desastrosas para seus colegas, mas que sempre deixariam Pauli ileso. Para um místico, não seria mero acaso, mas fruto da sincronicidade.

Jung acreditava na realidade de efeitos parapsicológicos, como a telepatia. Pauli era mais cético, mas colocou Jung em contato com outro importante físico quântico, Pascual Jordan, que publicou artigos buscando uma base física para a telepatia. Jung estava impressionado com os experimentos do psicólogo norte-americano Joseph Rhine, que publicou suas pesquisas no livro *Percepção Extra-Sensorial* (1935).

Pauli desde cedo havia se interessado pelo trabalho de dois cientistas renascentistas, o famoso astrônomo Johannes Kepler e o menos conhecido Robert Fludd. Boa parte do livro de Kepler, *A Harmonia do Mundo*, era um exercício de numerologia, dentre os quais estava a sua famosa “terceira lei” do movimento planetário. Kepler defendia que o número 3 era a chave para o funcionamento do universo, ao passo que Fludd defendia que seria o número 4. Isso era significativo para Pauli justamente porque o seu princípio de exclusão introduzia um quarto número quântico na descrição do átomo. Seu interesse nesses dois autores culminou em um artigo que publicou em 1952, intitulado “A influência das ideias arquetípicas nas teorias científicas de Kepler”, em um livro cujo outro autor era Jung, que escreveu o artigo “Sincronicidade: um princípio de conexão acausal”. O livro foi traduzido para o inglês com o título *The interpretation of nature and the psyche* (Pantheron, Nova Iorque, 1955).

Outro interesse numerológico de Pauli, que dá o título ao livro de Miller, é o número $1/137$ que aparece na teoria atômica, e é conhecida como “constante de estrutura fina”. O número foi encontrado em 1916 pelo orientador de Pauli, Arnold Sommerfeld, e seu inverso é muito próximo do número 137; para ser mais exato, é 137,036... O interesse neste número surge do fato de que ele não depende das unidades adotadas (por exemplo, metros ou centímetros). Um povo na galáxia de Andrômeda encontraria o mesmo valor $1/137$ para esta constante, cujo valor é calculado a partir da expressão $(2 \pi) e^2 / (h c)$, onde e é a carga do elétron, h a constante de Planck e c a velocidade da luz no vácuo. O primeiro a perceber que a constante de estrutura fina é o inverso de 137 foi o astrônomo Arthur Eddington, em 1929, que buscou uma explicação numerológica para este fato, o que foi recebido com risos pela comunidade científica. Porém, o próprio Pauli se voltou para esta questão, em 1934, buscando derivar o valor desta constante a partir da teoria quântica de campos que ele e Heisenberg estavam tentando desenvolver (e que acabou não vingando). Voltaram ao assunto em 1957, novamente fracassando. Vários físicos refletiram sobre este número e sua importância, como Max Born e Richard Feynman. Um amigo de Pauli observou que o número 137 tem significado especial na cabala judaica, e o número apareceu em sonhos de Pauli e fez parte de suas discussões com Jung. Quando Pauli morreu, ele estava internado no quarto 137 do Hospital da Cruz Vermelha de Zurique!

Ao contrário de Jung, Pauli não considerava que a noção de sincronicidade se aplicasse ao contexto da física, mas apenas ao domínio da consciência, regida pelo inconsciente coletivo. Questionado por Jung, Pauli examinou o fenômeno do decaimento radioativo como possível manifestação da sincronicidade. Neste fenômeno, os decaimentos medidos surgem de maneira completamente aleatória. Pauli sugeriu que o estado de um núcleo radioativo antes da medição seria análogo à relação de um ser humano com seu inconsciente coletivo. E em analogia à redução de estado (colapso quântico), no instante que uma consciência individual fosse analisada, a sincronicidade (dada pela conexão com o inconsciente coletivo) desapareceria.

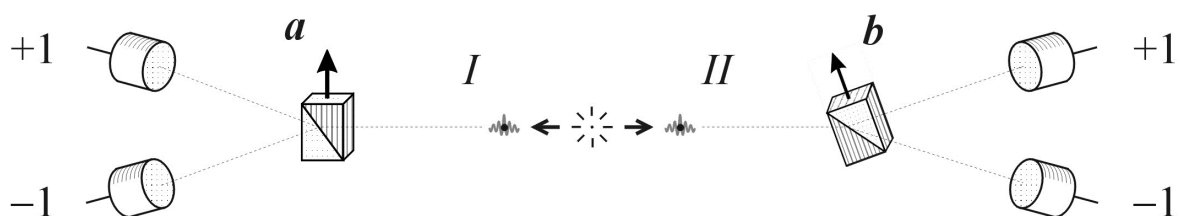
O mais irônico na busca de Pauli e Jung pela sincronicidade na física quântica é que Pauli desprezou completamente o fenômeno em que este conceito se manifesta de maneira mais clara: o emaranhamento de duas partículas, exposto no artigo de Einstein, Podolsky & Rosen (EPR, 1935), e explorado por Schrödinger e Furry. Hoje em dia, o conceito de sincronicidade, definido como uma correlação acausal, se aplica muito bem para o que geralmente é chamado “não-localidade quântica”, envolvendo partículas que interagem e depois se separam espacialmente, sem sofrer muita perturbação do ambiente externo (ver texto 18, “Teorema de Bell para Crianças”). Está claro que, no contexto da física, o termo “sincronicidade” não deve ser usado com a conotação de uma coincidência “significativa” (como fazia Jung), a não ser por físicos místicos. Pauli chegou a estudar o artigo de EPR, mas ele descartou sua importância ao comentar (em 1948) que o estado quântico, que sofre alterações instantâneas ao ser medido, não representa uma entidade real, mas apenas o nosso conhecimento ou informação a respeito do sistema emaranhado.

42. Teste Experimental do Teorema de Bell

No texto 18, “Teorema de Bell para Crianças”, apresentamos o dilema de Bell, que diz que qualquer interpretação da mecânica quântica deve abandonar ou o realismo, ou a localidade (ou os dois). Mas o que é mesmo “realismo” e “localidade”?

Para esclarecer isso, vamos considerar o experimento usado para testar o teorema de Bell, usando luz. No regime quântico, a luz é detectada de forma pontual, com energia discretizada, e a esses eventos de detecção se dá o nome “fótons”. O experimento em questão detecta pares de fótons, e mede sua “polarização”. Para quem não sabe, a polarização é a direção em que uma onda transversal oscila: por exemplo, uma marola (onda bem pequena) no mar é polarizada verticalmente, pois quando uma marola passa por um surfista, ele oscila com sua prancha na direção vertical. Polarização é um caso particular de “spin”.

O esquema do experimento está na figura abaixo.



Um par de pacotes de onda é gerado no centro, e eles levarão à detecção simultânea de um par de fótons (indicados por I e II). Cada pacote passa por um prisma birrefringente que separa a luz em polarizações perpendiculares. O pacote da esquerda passa por um prisma orientado na direção **a**, de forma que a luz detectada com valor +1 (em cima) tem polarização “a”, e a detectada com valor -1 tem polarização “a + 90°” (ou seja, é ortogonal). Para uma partícula individual, a probabilidade de cada um desses resultados é $\frac{1}{2}$, e o resultado é imprevisível. O pacote de onda que rumo para a direita passa por um prisma orientado em outra direção, **b**, contida no plano perpendicular à direção de propagação da luz.

O estado quântico do par de pacotes de onda carrega todo o mistério do problema, e é dito um estado “emaranhado” ou “entrelaçado”. Para entender porque ele é misterioso, considere o caso em que $\mathbf{a} = \mathbf{b}$ (ou seja, os dois prismas estão orientados na mesma direção). Para um determinado estado emaranhado, podemos ter “anticorrelação perfeita”. Isso significa que sempre que o valor medido de I for +1, o de II será -1 (e sempre que o valor de I for -1, o de II será +1). Até aqui tudo bem, esta é uma situação facilmente explicável pela física clássica. O mistério surge do fato de que esta anticorrelação perfeita ocorre para qualquer valor do ângulo $\mathbf{a}$! Falando assim pode parecer trivial, mas não é. Este estado emaranhado tem “simetria rotacional”: antes da detecção, as polarizações das duas partículas são ortogonais, mas elas não apontam numa direção definida! (Esta simetria, por sinal, é a situação dos dois elétrons no átomo de hélio.)

O teorema de Bell (1964) explora esta simetria inusitada de sistemas quânticos de duas partículas (ou dois pacotes de onda). Ele quis mostrar que a física clássica não explica o comportamento de estados quânticos emaranhados. Schrödinger (1935) e Furry (1936) já tinham mostrado as dificuldades da física clássica para explicar o experimento de anticorrelação com $\mathbf{a} = \mathbf{b}$, e Bohm & Aharonov (1957) mostraram que um experimento realizado por Wu & Shaknov em 1950 favorecia as previsões da física quântica, em detrimento da clássica. Mas Bell encontrou uma maneira diferente de atacar o problema, e seu resultado acabou sendo mais geral do que esses estudos anteriores.

Para testar o teorema de Bell, é preciso utilizar prismas orientados em ângulos diferentes, ou seja, $\mathbf{a}$ diferente de $\mathbf{b}$. Além disso, não basta realizar o experimento com um par de orientações $(\mathbf{a}, \mathbf{b})$, mas é preciso considerar também outros pares de ângulos, por exemplo $(\mathbf{a}, \mathbf{b}')$, $(\mathbf{a}', \mathbf{b})$, $(\mathbf{a}', \mathbf{b}')$. Ou seja, para testar o teorema de Bell é preciso (neste caso) efetuar quatro séries de experimentos diferentes, e supor que o estado quântico em cada caso é o mesmo. Esta suposição faz parte de um conjunto de hipóteses usadas nos testes experimentais do teorema de Bell, e que recebem o nome de “indução” ou “amostragem justa”.

Voltemos agora para o trabalho original de Bell, para entender como ele incorporou as hipóteses de “realismo” e “localidade”, que juntos com a “indução” (mencionada no parágrafo anterior) formam o trilema de Bell. (Não era “dilema”? Sim, mas a indução é geralmente desprezada, e é por isso que Leggett se referiu a ela como “a Cinderela de todo esse assunto”).

No trabalho de 1964 de Bell, “realismo” significa que o resultado de qualquer medição quântica é pré-determinado, mesmo que nós tenhamos a impressão de que os resultados sejam aleatórios. Outra maneira de dizer que uma teoria é realista, neste contexto, é dizer que ela é uma “teoria de variáveis ocultas” (TVO). Por exemplo, na medição de polarização de um pacote de onda “monofotônico” (ou seja, que levaria um detector 100% eficiente a disparar uma única vez), o resultado já estaria pré-determinado. No caso da partícula da esquerda, podemos denotar esse “valor possuído” por I , onde I é igual a +1 ou -1. Supondo que I de fato pré-existe à medição, de que variáveis ele dependeria? Ele dependeria das orientações dos prismas, $\mathbf{a}$ e $\mathbf{b}$, e de quaisquer outras variáveis ocultas v (geralmente escrito como a letra grega λ). Assim, a hipótese do realismo, no primeiro artigo de Bell, é expresso pela existência de um número bem definido $I(\mathbf{a}, \mathbf{b}, v)$, e também pelo análogo valor $II(\mathbf{a}, \mathbf{b}, v)$. Realismo é isso! A suposição de que existe uma realidade não-observável (no caso, as variáveis ocultas v) que tem valores bem definidos e que explica aquilo que observamos.

Agora ficou fácil de definir “localidade”. Este conceito designa a situação em que o resultado obtido para a partícula da esquerda não depende da escolha de orientação do prisma da direita.

Assim, o valor $I(\mathbf{a}, \mathbf{b}, v)$ pode ser simplificado para $I(\mathbf{a}, v)$, pois o resultado I não depende (segundo a suposição da localidade) da orientação $\mathbf{b}$ do prisma localizado à distância. Analogamente, $II(\mathbf{a}, \mathbf{b}, v)$ é simplificado para $II(\mathbf{b}, v)$.

Na demonstração feita por Bell, a hipótese da localidade permite que o valor $I(\mathbf{a}, \mathbf{b}, v)$ seja identificado com $I(\mathbf{a}, \mathbf{b}', v)$, já que ambos são iguais a $I(\mathbf{a}, v)$. Não reproduziremos a prova de Bell, mas ao final ele obtém um resultado envolvendo coeficientes de correlação $c(\mathbf{a}, \mathbf{b})$, que são as médias dos produtos $I \cdot II$ para várias medições de pares. Tal resultado, em versão derivada por Clauser, Horne, Shimony & Holt (1969), é que a soma $c(\mathbf{a}, \mathbf{b}) + c(\mathbf{a}, \mathbf{b}') + c(\mathbf{a}', \mathbf{b}) - c(\mathbf{a}', \mathbf{b}')$, para teorias realistas locais, tem valor entre -2 e 2 . No entanto, há situações experimentais em que essa soma é violada. Este é o teorema de Bell, expresso por uma desigualdade (o módulo da soma escrita acima é menor ou igual a 2).

Os testes experimentais que começaram a ser feitos a partir de 1969 buscavam justamente obter experimentalmente um valor acima de 2 (ou abaixo de -2). Os primeiros resultados positivos foram obtidos por Freedman & Clauser (1972), na Universidade de Berkeley, na Califórnia. Algumas simplificações e hipóteses de trabalho tiveram que ser introduzidas, obtendo-se um caso especial de desigualdade, para teorias realistas locais, expressa por H menor ou igual a 1 . Freedman & Clauser obtiveram o valor $1,20$, com um erro estimado em mais ou menos $0,03$.

Outros experimentos foram realizados, sendo que o ponto alto foi a versão realizada em Orsay, na França, por Aspect, Grangier & Roger, em 1982, na qual a orientação dos polarizadores era modificada após o par de partículas ter sido emitido. Este experimento de escolha demorada foi importante para descartar a possibilidade de que a informação sobre as orientações dos prismas polarizadores fosse de alguma maneira transmitida para a fonte antes da emissão do par de partículas. Em um de seus experimentos, obtiveram um valor de $2,697$ (com erro de $0,015$), bem acima do limite de 2 da desigualdade de Bell.

Em Genebra, experimentos coordenados pelo físico Nicolas Gisin, a partir de 1998, conseguiram verificar a violação da desigualdade de Bell para pares de fótons separados a mais de 18 km!

No experimento do grupo de Alain Aspect, a escolha das orientações dos prismas não era feita de maneira aleatória. Assim, o grupo de Anton Zeilinger, de Innsbruck (Áustria), liderado por G. Weihs, refizeram o experimento em 1998, fazendo com que a escolha das orientações dos prismas fosse consequência de uma outra medição quântica aleatória. Isso torna menos provável que haja uma “conspiração da natureza”, que esteja nos enganando a respeito da impossibilidade de teorias realistas locais.

Mesmo assim, há físicos que conseguiram construir teorias de variáveis ocultas locais que violam alguma suposição feita nos experimentos, mas que conseguem explicar os resultados obtidos. O exemplo mais célebre é o trabalho de Marshall, Santos & Selleri (1983), cuja teoria viola uma hipótese conhecida como “não-realce” (*non-enhancement*, em inglês). Simplificadamente, esta hipótese diz que se um obstáculo for colocado no caminho da luz, a intensidade transmitida não poderá ser maior do que era antes do obstáculo.

Tais situações são chamadas de “furos” (*loopholes*) dos testes da desigualdade de Bell. Esses furos são bem pequenos, e quase ninguém acredita que eles sejam sérios. Mas eles estimulam alguns físicos experimentais a buscarem um teste “sem furos” para descartar teorias realistas

locais. Mesmo quando isso acontecer, porém, algum físico mal-humorado poderá ainda lembrar que uma violação de alguma tese relacionada à indução (a “Cinderela” que mencionamos acima) pode salvar as teorias realistas locais. Mas tal violação seria tão esquisita (por exemplo, o resultado de uma corrida experimental afetar o resultado da corrida seguinte), que ninguém se preocupa com ela.

O que alguns físicos têm afirmado é que um outro tipo de desigualdade, proposta por Anthony Leggett, mostraria que o dilema de Bell (“ou descartar o realismo, ou a localidade, ou ambos”) é muito fraco, pois na verdade seria preciso descartar o realismo como um todo. Mas essa conclusão não é justificada, e parece ter sido influenciada pela filosofia “pós-modernista”, que combate a existência de verdades absolutas. Um teste experimental foi realizado em 2007 por Gröblacher e colaboradores, e o resultado é muito interessante, mas ainda é possível defender uma interpretação realista da teoria quântica, desde que ela seja não-local (como a teoria de Bohm, que vimos no texto 23, “A Interpretação da Onda Piloto”).

43. Os Estados Coerentes de Glauber

A Física Quântica possui vários mistérios. Não se sabe ao certo quais são os mistérios mais fundamentais, e quais são os derivados; quais os mistérios que são peculiares a uma ou a poucas interpretações, quais os que permeiam todas as interpretações. No texto 32, “Quatro Aspectos Essenciais da Física Quântica”, sugeri que haveria quatro mistérios fundamentais, mais isso é passível de discussão.

Na literatura de divulgação da Mecânica Quântica, há certos mistérios que são muito populares: colapso, gato de Schrödinger, dualidade onda-partícula, não-localidade, escolha demorada, indistinguibilidade, Zenão quântico, medição sem troca de quanta, etc. Há, porém, um formidável mistério associado a um conceito frequentemente desprezado em discussões de filosofia da física quântica (mas não por físicos profissionais): os estados coerentes de Glauber.

Roy J. Glauber ganhou o Prêmio Nobel de Física em 2005 pelo desenvolvimento, em 1963, da teoria quântica do laser. Na figura abaixo, ele trabalha como varredor de aviõezinhos de papel na entrega do Prêmio IgNobel, na Universidade de Harvard.



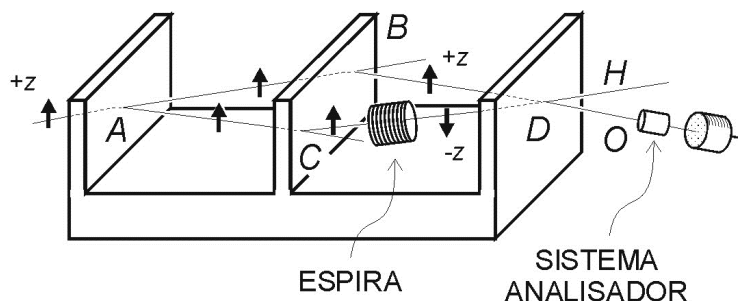
O estado quântico do laser é escrito como uma superposição de estados $|n\rangle$, onde cada $|n\rangle$ tem um número n de fótons. Em outras palavras, se um pacote de onda é preparado com apenas 1 fóton, esse estado pode ser escrito como $|1\rangle$. Se ele tiver exatamente dois fótons, seu estado é $|2\rangle$. Em geral, porém, um estado quântico de luz não tem um número exato de fótons, mas uma superposição deles. Por exemplo, se o estado for a soma $|1\rangle + |2\rangle$, isso significa que metade das vezes mediremos 1 fóton, e a outra metade encontraremos 2 fótons no pacote de onda (supondo detectores 100% eficientes).

Segundo a teoria óptica quântica de Glauber, o estado do laser é uma superposição de infinitos estados $|n\rangle$, sendo que cada estado tem diferentes pesos. O fato de ser uma soma “infinita” não é em si um problema, já que se trata de uma descrição teórica, que corresponde apenas idealmente (aproximadamente) ao mundo real. Esse estado foi chamado por Glauber de “estado coerente”, em referência ao laser, mas este não é um nome muito bom, pois a “coerência de fase” ocorre para ondas em geral. Assim, se quisermos evitar ambiguidades, podemos chamá-los de “estados coerentes de Glauber”.

Um aspecto surpreende desse estado coerente é que ele é um “auto-estado do operador de destruição”, o que significa dizer que a remoção de um fóton de um raio laser mantém o laser no exato mesmo estado! Mas como é possível isso? Se eu tiro um fóton, o estado é o mesmo; se retiro outro, ele permanece no exato mesmo estado; e depois que eu removi um milhão de fótons, ele permanece no mesmo estado? Pela teoria, sim; na prática, talvez não, o que indicaria que um feixe de laser real não é *exatamente* um estado coerente.

O fato é que essa propriedade dos estados coerentes de Glauber tem consequências experimentais importantes. Consideremos um experimento de interferência (semelhante ao interferômetro de Mach-Zehnder, que vimos no texto 13, “A Escolha Demorada”) envolvendo *nêutrons*. A figura abaixo representa esquematicamente este experimento, realizado na década de 1980 pelo grupo de físicos em torno de Helmut Rauch, de Viena. Um feixe de nêutrons sofre difração em A, dividindo-se em dois feixes. A setinha apontada para cima indica o “spin” do nêutron. Em B e C ocorre nova difração do feixe, sendo que dois destes feixes recombinam em D, gerando interferência, que é detectada em O de maneira meio complicada.

O ponto a ser salientado é a ação da espira inversora de spin, que transforma o estado $+z$ no estado $-z$.



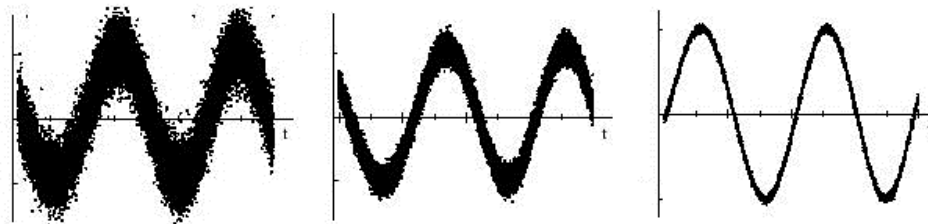
Se esta espira for de um certo tipo, utilizando oscilações de rádio-frequência, a transformação do estado $+z$ em $-z$ envolve a transferência de um fóton de energia (pois todo o experimento é realizado dentro de um campo magnético estático). Ora, se há transferência de um fóton entre o nêutron e a espira, então pareceria possível determinar a trajetória do nêutron, examinando se há um fóton a menos na espira. Mas isso violaria o princípio de complementaridade (dualidade onda-partícula), pois este experimento é considerado um fenômeno ondulatório!

Na verdade (conforme apontado em um artigo de Anthony Leggett), o que acontece é que o campo de rádio-frequência na espira é um estado coerente de Glauber. Isso significa que o campo, mesmo perdendo um fóton (que é absorvido pelo nêutron, para mudar de spin), permanece no mesmo estado. Assim, não há informação de trajetória disponível na espira. (Esta conclusão pode também ser obtida utilizando-se o princípio de incerteza.)

Este comportamento da espira é notável. A espira (e a bateria que lhe alimenta) altera a energia do nêutron sem que a mudança de energia da espira seja detectável. Ela age como se fosse um... sistema macroscópico clássico! O laser também se comporta de maneira próxima a um sistema clássico: é considerado o sistema quântico que é o mais próximo de uma onda senoidal clássica.

Os estados coerentes foram descritos pela primeira vez por Erwin Schrödinger, em 1926, na esperança de encontrar um pacote de onda que não se dispersasse durante a propagação (agindo portanto como uma partícula clássica). A solução encontrada, porém, só mantém a sua forma em sistemas especiais (como o oscilador harmônico simples), e não para a propagação no espaço livre, como mostrou o arquirival de Schrödinger, Werner Heisenberg.

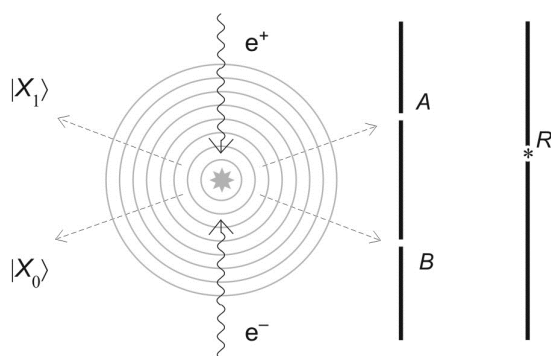
O estado coerente tem também a propriedade de ser um estado de incerteza mínima, ou seja, ele minimiza o produto das incertezas de duas observáveis incompatíveis (como posição e momento). No caso do laser, as incertezas que são minimizadas são aquelas da amplitude da onda (ou número de fótons) e da fase da onda. A figura abaixo, obtida por G. Breitenbach e tirada da Wikipédia, corresponde a medições de número de fótons em três feixes de laser, ao longo do tempo. O feixe da esquerda é bem fraco, e apresenta uma média de 4 fótons (na janela temporal das medições); o do meio tem uma média de 25 fótons; e o da direita apresenta uma média de quase 1000 fótons. Este último se parece bem com uma onda clássica, as incertezas se tornam bem pequenas, e a fase da onda (ou seja, em que ponto começa a subir) é bem distinta. Mas para o feixe fraco, fica aparente que o laser apresenta



incerteza tanto na amplitude quanto na fase.

Sempre que o campo quântico possui um limite clássico, a descrição por meio dos estados coerentes de Glauber torna evidente este limite.

Para finalizar esta discussão, vamos voltar ao experimento da fenda dupla, que vimos no texto 4, “A Primeira Lição de Física Quântica”. Naquele experimento, formam-se franjas de interferência na tela detectora, e o fenômeno é considerado ondulatório. Suponha agora que a luz é gerada em pares de fótons que rumam em sentidos opostos (na mesma linha), obtidos por exemplo no processo de aniquilamento elétron-pósitron. Na figura abaixo, representa-se o par de fótons como uma onda esférica. O fóton que ruma para a direita pode incidir na tela detectora, por exemplo em R. Após um grande número de detecções, esses fótons da direita formarão franjas de interferência?



A resposta é *não*, pois cada fóton da direita está correlacionado com um fóton da esquerda, e se a posição destes for medida, isso indica qual é a trajetória do fóton da direita. Por exemplo, se a posição medida à esquerda for X_1 , isso indica que o fóton da direita passou pela fenda B. Há assim informação de trajetória no sistema, e o fenômeno é corpuscular. Pelo princípio de complementaridade, não pode haver franjas de interferência (típicos apenas de fenômenos ondulatórios).

Agora voltemos para o experimento da fenda dupla usual. Quando os fótons individuais passam pelas fendas, eles interagem com o anteparo (onde estão localizadas as fendas). Será que a informação da trajetória não poderia ficar registrada nos microscópicos recuos do anteparo (no deslocamento de algum átomo para um estado ortogonal)? Vimos no texto 17, “O Primeiro Debate Einstein-Bohr”, como Bohr mostrou que semelhante tentativa fracassa, devido ao princípio de incerteza aplicado ao anteparo. Outra maneira de ver esta situação é considerar que o anteparo macroscópico se encontra num estado coerente, e portanto qualquer transferência de momento não altera seu estado (não havendo assim informação de trajetória).

Às vezes costuma-se afirmar que uma partícula em superposição quântica, ou um par de partículas emaranhadas, ao interagir com outros sistemas, coloca-os todos em um grande estado emaranhado, e que no limite todo o Universo fica numa superposição emaranhada (ver texto 22, “As Interpretações dos Muitos Mundos”). No entanto, a existência de sistemas em um estado coerente de Glauber pode quebrar esta “contaminação de emaranhamentos”.

A filosofia da física quântica ainda não explorou adequadamente os estados coerentes. Por que a transição do quântico para o clássico (princípio de correspondência) se dá geralmente por meio dos estados coerentes? Qual papel esses estados poderiam ter na descrição de medições quânticas?

44. Budismo e Física Quântica

Caiu em minhas mãos o livro *Buddhism and Science: Breaking new ground* [Budismo e ciência: Abrindo novos caminhos] (Columbia University Press, 2003), editado por B. Alan Wallace, autor de outros livros na interface budismo/ciência. Quinze artigos discutem diferentes aspectos da relação entre ciência e budismo, começando com uma excelente introdução de Wallace, que salienta alguns aspectos gerais da visão de mundo budista.

O budismo surgiu em meio às antigas tradições védicas na Índia, em torno do séc. V a.C., propondo um “caminho do meio” de moderação entre a luxúria e as práticas ascéticas extremas. Como as outras tradições místicas do hinduísmo e do jainismo, o budismo se baseia em técnicas de meditação que combatem o sofrimento humano, causado pelo desejo, e que promovem auto-conhecimento. O que distingue a visão de mundo budista é a concepção de que nada no mundo é permanente, e o “eu” individual não existe. O que haveria é uma nuvem de eventos momentâneos que formam complexos que identificamos como uma coisa ou como o eu. Não há assim a noção de uma alma individual e eterna que transmigraria de uma vida para outra. Os budistas acreditam em um ciclo de nascimento e morte, e a ligação seria feita por leis de causa e efeito (e não pela permanência de uma alma), chamados “carma”, onde boas ações levariam a bons retornos. O renascimento poderia se dar em cinco ou seis reinos diferentes, um dos quais é o dos homens. O ciclo cessaria ao se atingir a liberação final do “nirvana”. O budismo considera que certas perguntas metafísicas não têm resposta, como se o Buda continuou existindo após a morte ou qual a origem do Universo. Valorizam também as atitudes morais da benevolência (bondade amorosa, ou querer que os outros sejam felizes), compaixão (desejo de livrar os outros de sofrimento), alegria simpática (alegria pela felicidade dos outros) e equanimidade (serenidade de espírito e considerar todos os seres como iguais).

As três principais tradições budistas hoje em dia são a Teravada (mais antiga, hoje centrada em Sri Lanka e no Sudeste Asiático), a Mahaiana (originada em torno do séc. II, e presente no Leste Asiático, incluindo China, Coreia, Viet-Nam; o zen budismo do Japão combinaria esta tradição com elementos do taoísmo) e a Vajraiana (derivada da Mahaiana e presente no Tibete e Ásia Central). Na Antiguidade, antes da ascensão da Mahaiana, havia 18 escolas budistas, cujas doutrinas eram condensadas em textos conhecidos como Abhidarma, que apresentam detalhadas descrições do mundo físico e do mundo psicológico.

No livro em questão, William J. Ames, mestre em física e doutor em estudos budistas, apresenta uma exposição de duas doutrinas budistas distintas, buscando compará-las com as físicas clássica e quântica. A doutrina que Ames considera mais próxima da física clássica está presente nos Abhidarma de escolas antigas, como a Teravada e a Sarvastivada. As coisas do mundo são concebidas em termos de eventos momentâneos, que no caso dessas escolas são vistos como fenômenos reais, chamados “darmas”. Haveria em torno de 80 tipos de darmas, que podem ser mentais ou físicos. Exemplos de darma físico são sons e formas visíveis. Os objetos que perduram no tempo seriam ilusões cinemáticas produzidas pela rápida sequência de darmas semelhantes.

Pelo fato de os *darmas* serem considerados reais, Ames chama a cosmovisão apresentada nos *Abhidharma* de “realista”, e a aproxima da Física Clássica, que também buscaria analisar a realidade em termos de partes simples, como partículas e forças. No entanto, o que é chamado de “realismo” no budismo é mais próximo de um “fenomenalismo” na ciência. A concepção ocidental que mais se aproxima dos textos do *Abhidharma* é a filosofia empirista radical do escocês David Hume (séc. XVIII), desenvolvida no século seguinte pelo físico Ernst Mach e por filósofos britânicos. Esta visão atribui realidade apenas para o que é observado, não para entidades inobserváveis, e além disso divide o campo observacional em elementos, “dados dos sentidos”, que seriam associados pela mente. Assim como para o budismo do *Abhidharma*, uma coisa que observamos ou o próprio “eu” seriam na verdade um complexo de sensações elementares. Supor que um objeto tem permanência seria para Mach apenas uma especulação metafísica, e para o budismo apenas uma ilusão.

Em suma, podemos concordar com Ames de que é possível interpretar a Física Clássica de maneira próxima ao budismo do *Abhidharma*, mas uma concepção “realista” da Física Clássica, que postula a existência de entidades inobserváveis (como átomos, espaço absoluto ou éter luminífero, no séc. XIX), não tem paralelos no budismo. E da mesma maneira que é possível interpretar a Física Clássica em termos fenomenalistas, também é usual fazê-lo na física quântica (ver texto 35, “Por que há tantas interpretações da teoria quântica?”). Assim, o budismo do *Abhidharma* também pode ser considerado próximo a uma parte das interpretações da Física Quântica, mas não todas.

A argumentação de Ames, porém, segue outra linha. Para fazer uma aproximação com a Física Quântica, ele escolhe outra escola budista, da tradição Mahaiana, que é a escola *Madhiamaca* fundada pelo grande filósofo Nagarjuna em torno do séc. II. Uma das novidades introduzidas por esta escola é a noção de “vazio”, que significa “falta de natureza intrínseca” (falta de essência). Por exemplo, para a escola *Saravastivada* (mencionada acima), o calor seria o *darma* correspondente à natureza intrínseca do fogo, mas para Nagarjuna esta não pode ser a essência do fogo, pois o fogo depende da madeira e de outros fatores causais antecedentes para existir. Esta questão é análoga ao “problema da mudança” lançado pelo filósofo grego Parmênides, mas a solução de Nagarjuna de negar essências não foi seguida pelos gregos posteriores a Parmênides (talvez só Heráclito se aproximasse).

Enfim, para a escola *Madhiamaca*, não haveria propriedades intrínsecas às coisas, mas todas as propriedades seriam *relacionais*, dependentes das relações entre os *darmas*. Ames salienta que isso se aproxima da interpretação ortodoxa da teoria quântica, que não atribui a um elétron uma posição ou velocidade: estas só aparecem em relação a um aparelho de medição. Porém, Ames nos lembra que um elétron tem algumas grandezas intrínsecas, como massa e carga: assim, o paralelo entre a visão *Madhiamaca* e a física quântica não seria completa. No entanto, existem físicos que defendem uma interpretação completamente relacional da física. Novamente Mach compartilhava desta visão (além de outros filósofos, como Leibniz e Berkeley), e hoje em dia podemos mencionar o inglês Julian Barbour e o brasileiro André Assis, entre outros. Assim, ao que parece, seria possível interpretar a física moderna de acordo com esta concepção relacional *Madhiamaca*.

Voltando ao livro em questão, um dos nomes mais importantes da área de fundamentos da física quântica, Anton Zeilinger, apresenta um relato do encontro entre um grupo de cientistas e de budistas com Tenzin Gyatso, o 14º Dalai Lama (de uma das cinco escolas da tradição *Vajraiana* do Tibete), em 1998. Dentre vários tópicos discutidos, o Dalai Lama salienta que se

a ciência chegar a uma conclusão segura que viole os ensinamentos do budismo, então esses ensinamentos budistas deverão ser abandonados.

David Finkelstein, nome importante e radical dos fundamentos lógicos da física, apresenta um artigo intitulado “Vazio e Relatividade”, que parte de uma explicitação do conceito de “vazio” para o budismo, que seria a tese de que tudo é relativo, de que não há entidades absolutas no Universo. Apresenta cinco pontos de semelhança entre a visão de mundo budista e a física moderna. (1) O uso de lógicas não-clássicas. (2) O mundo visto como padrões de eventos de destruição e criação. (3) Concepção atomizada do tempo (haveria uma unidade mínima de tempo, às vezes chamada “crônon”). 4) Holismo ou não-decomponibilidade do mundo. (5) A incompletude de qualquer representação do mundo.

O filósofo da ciência francês Michel Bitbol compara o budismo Madhiamaca, iniciado por Nagarjuna, com a filosofia de Immanuel Kant. Bitbol é bem conhecido por reavivar a tradição de interpretações neokantianas da mecânica quântica, esboçada na década de 1930 por Ernst Cassirer, Grete Hermann e Carl von Weizsäcker, salientando porém que a teoria quântica não deve ser vista como “representando” os fenômenos, mas sim como fornecendo “instrumentos” para agir na realidade fenomênica (uma postura mais pragmática). No Brasil, a filósofa Patrícia Kauark Leite (UFMG) segue esta tradição neokantiana na mecânica quântica. Mas voltando ao texto de Bitbol, este sugere três maneiras de incorporar as preocupações Madhiamacas/kantianas na física quântica. Primeiro, desconstruindo as ilusões ontológicas da física, ou seja, atacando a noção de que existem objetos reais independentes do observador. Bitbol pode ser enquadrado na contemporânea corrente “pós-modernista” (relativista) da filosofia, bastante forte na França, e que combate a noção de uma “realidade objetiva”. Em segundo lugar, aplicando a lógica dialética, de raciocinar a partir de opostos, para a antinomia entre determinismo e indeterminismo na física quântica (lembrando que nenhuma dessas duas posições pode ser provada). Terceiro, argumentando que as *relações* entre as entidades é mais importante do que as próprias entidades, ponto este explorado por Ames, conforme visto acima.

O livro apresenta também uma série de artigos comparando noções psicológicas ocidentais com aquelas do budismo, incluindo os estados atingidos através da meditação. Estes artigos incluem um texto do Dalai Lama e outro do biólogo chileno Francisco Varela. Dois outros artigos traçam aspectos históricos da relação entre budismo e ciência, como o de José Ignacio Cabezon, que não deixa de mencionar o bem conhecido livro de Fritjof Capra, *O Tao da Física*, lançado em 1976. Capra ressaltara a inseparabilidade do sujeito e objeto, incorporado na noção de “observador-participante” do físico John Wheeler, também mencionado por Ames. Outro ponto, expresso nos textos Avatamsaca do Budismo Mahaiana, e também nos tantras do Budismo tibetano, é a concepção de uma teia cósmica de relações mútuas entre todas as partes do Universo. Isto seria semelhante à concepção holista da física quântica, exemplificado especialmente por partículas em estado “emaranhado”. No entanto, pode-se argumentar que na Física Clássica também ocorre uma interação mútua entre todas as partes do Universo, a diferença sendo que nesta as forças sempre diminuem com a distância de separação entre as partes.

Para finalizar esta breve comparação do budismo com a física quântica, vale mencionar o caso de um físico brasileiro que abandonou a carreira científica para se tornar mestre budista. Trata-se de Alfredo Aveline, professor de física na UFRGS, em Porto Alegre, que agora é o Lama Padma Samten. Uma amostra de suas idéias está no sítio

http://www.cebb.org.br/images/stories/docs/ciencia_mente_lama_padma_samten_univ_sao_marcos.pdf . Para ele, o que aproxima a física quântica do budismo é o fato de que o observador não pode ser separado dos fenômenos observados. Assim, não se poderia falar em uma realidade independente da mente, nem na física nem no budismo. Vimos este ponto sendo salientado também por Capra e Ames. Podemos dizer que tal conclusão é correta para uma parte das interpretações da teoria quântica, que chamamos “fenomenalistas”, e que incluem a concepção de Niels Bohr, citado por Samten, mas ela não é aceita pelas interpretações mais realistas da teoria quântica.

Para concluir, gostaria de tecer um comentário sobre a busca de “paralelos” entre as tradições místicas orientais e a física moderna, para usar a expressão de Capra. Uma visão de mundo geralmente apresenta (i) teses filosóficas muito gerais sobre o mundo (por exemplo, “Deus criou o mundo” ou “não há permanência no mundo”), e muitas vezes pode também apresentar (ii) teses factuais testáveis a respeito do mundo (por exemplo, “o homem evoluiu a partir do cação”, como defendia Anaximandro).

Quanto às teses testáveis (ii), às vezes uma concepção filosófica antiga pode afirmar algo que é aceito hoje em dia pela ciência, como que existem átomos (Demócrito) ou que o Universo se iniciou em uma grande explosão (Empédocles). No entanto, não se pode atribuir essas antecipações das teses empíricas científicas a um poder de premonição ou capacidade intuitiva de perceber verdades profundas, que os antigos teriam. Trata-se apenas do fato de que os antigos, em qualquer continente, eram muito inteligentes e imaginativos, e propuseram diversas visões de mundo diferentes, cobrindo uma boa parte das possibilidades de como o mundo poderia ser. Alguns acabaram acertando, de maneira aproximada.

Uma avaliação distinta se aplica às concepções gerais de mundo (i), as “cosmovisões”. Estas geralmente não podem ser derrubadas pela ciência, e portanto é sempre possível adaptar uma visão filosófica geral ao conteúdo factual da ciência, nas chamadas “interpretações”. Assim, não é surpreendente que se possa propor para Física Moderna uma interpretação Saravativada ou Madhiamaca, ou mesmo um idealismo budista mais radical, como o Iogacara, para quem só existem representações mentais.

45. Misticismo ou Espiritualidade Quântica?

O termo “misticismo quântico” tem sido usado por diversos autores para se referir às propostas de estender a mecânica quântica para além dos domínios da física, para a psicologia, administração de empresas, religião, parapsicologia, etc. No entanto, as pessoas que adotam essa perspectiva, de que a espiritualidade humana teria como base física a teoria quântica, consideram o termo pejorativo. Qual seria um termo mais adequado? E como distinguir as diferentes correntes que defendem a importância da física quântica na explicação da consciência e da espiritualidade?

Começemos com a definição de “misticismo”. O *Dicionário de Filosofia* de Abbagnano define misticismo como toda doutrina que postula uma comunicação direta entre o homem e Deus. Este termo foi usado por Dionísio Aeropagita, no séc. V, para descrever o neoplatonismo de Plotino. Por um lado, seria impossível alcançar Deus através dos procedimentos ordinários do saber humano; por outro, haveria uma relação originária, íntima e privada entre o homem e Deus, um êxtase. No séc. XII, Bernardo de Claraval defendeu o

caminho místico contra a filosofia e, em geral, contra o uso da razão. Vemos assim que o misticismo defende um modo de conhecimento não-racional, que podemos chamar de intuição, e que no Cristianismo culmina na “contemplação” do divino. Outros pensadores medievais, como São Boaventura, cultivavam igualmente a especulação racional filosófica e a especulação mística.

No séc. XIV alemão, Meister Eckhart e outros místicos voltam a criticar o uso da razão no campo da religião. A frase de Eckhart, “Deus e eu, somos um”, exprimia a experiência mística da dissolução do eu (a dissolução da distinção sujeito-objeto). Autores como Ninian Smart, em seu *World Philosophies* (1999), apontam semelhanças entre a cosmovisão de Eckhart e a do hinduísmo do Vedanta Advaita. Claramente, a definição de misticismo se aplica bem para as correntes orientais do Hinduísmo, Budismo e Taoísmo, além da Cabala judaica, do Sufismo islâmico, etc.

A origem do termo “misticismo quântico” parece ter surgido das comparações entre a física quântica e o misticismo oriental, que foram exploradas por Fritjof Capra no seu *O Tao da Física* (ver texto 38, “As origens hippie do misticismo quântico”), mas que já tinham sido sugeridas antes por alguns fundadores da física quântica. O termo passou a ser adotado por críticos do movimento, sugerindo que haja aqui uma “mistificação”, que pode ser definida como uma interpretação obscura, tendenciosa ou falsa. Talvez seja por essa conotação negativa que o termo “misticismo” não é apreciado por muitos dos defensores de uma espiritualidade quântica.

William James, em seu livro *As Variedades da Experiência Religiosa* (1902), apresenta dois capítulos em que discute a consciência mística do ponto de vista da psicologia, e que são reproduzidos numa excelente coletânea editada por Patrick Grim, *Philosophy of Science and the Occult*. Para induzir o estado místico, James estudou os estados alterados da mente gerados pela inalação de óxido nítrico, inclusive em si mesmo. Ele descreveu sua experiência mística como uma “reconciliação” entre lados opostos do mundo. O misticismo seria uma atitude anti-naturalista, que se liga ao sobrenatural, seria otimista e veria a natureza como Deus (panteísmo). Quem tem a experiência mística se torna mais feliz, e geralmente tal experiência passa a guiar sua vida. Quem está de fora, porém, não é obrigado a aceitar as afirmações místicas de maneira acrítica. No entanto, segundo James, sempre será uma possibilidade que a experiência mística seja uma forma superior de conhecimento (em outras palavras, não se pode refutar a experiência mística, mostrar que ela é falsa).

Passemos agora para dois autores brasileiros. Frei Betto e Leonardo Boff publicaram em 1994 o livro *Mística e Espiritualidade*, em que exploram a experiência mística de “re-ligação” com a divindade, que se daria num nível prévio a qualquer elaboração conceitual. É interessante que, neste livro, Frei Betto discute a física quântica. Segundo ele, “quando, hoje, o cientista analisa a matéria, descobre duas coisas fantásticas: primeiro que, no seu ponto mais ínfimo, matéria é simultaneamente espírito e matéria”. Trata-se da tese conhecida como “panpsiquismo”, de que todas as coisas têm espírito ou consciência. Está claro que a afirmação de Betto é exagerada: a física quântica não implica que toda matéria seja espiritualizada. Trata-se de uma interpretação particular que pode até ser conciliada com a física quântica, mas está longe de ser uma conclusão da ciência moderna. A base para esta afirmação de Betto é a não-localidade quântica, que ele não consegue explicar bem, mas nos remete aos livros de Capra. Já vimos no texto 18 (“Teorema de Bell para crianças”) que há diversas interpretações diferentes para esta importante questão.

A segunda descoberta mencionada por Betto é o princípio de incerteza (ou de indeterminação). Em sua discussão, duas teses são associadas a este princípio: o indeterminismo (a quebra da causalidade) e o subjetivismo, segundo o qual “a subjetividade humana interfere no movimento de alguma coisa que deveria independê-la”. Conclui com a tese de Capra de que “os orientais já tinham pressentido o princípio de indeterminação três mil anos antes de Cristo. O que mais intriga os cientistas ateus, anti-religiosos, é o fato de as religiões orientais já o terem pressentido.” Está claro que este comentário não é aceito pelos físicos de partículas. Sempre poderemos traçar semelhanças entre visões de mundo, mas se houvesse algum conhecimento de microfísica contido nas cosmovisões antigas, elas deveriam poder ser usadas para fazer novas descobertas na física. Mas como comentou John Bell, “iremos todos sentar aos pés do Maharishi se ele nos disser onde o bóson de Higgs pode ser encontrado” (citado na coletânea de Grim, mencionada acima, p. 310).

Detive-me na apresentação de Frei Betto sobre o misticismo quântico porque ela representa bem as ideias pouco fundamentadas que circulam sobre a física quântica. Está claro que o tom crítico contra suas afirmações sobre física quântica não se estendem para sua obra maior, que merece grande respeito, assim como a de Boff. Vale mencionar que, segundo o livro *World Philosophies* mencionado acima, a contribuição mais original da filosofia latino-americana para o mundo foi a teologia da libertação, articulada entre outros por Leonardo e Clodovis Boff.

Retomando a discussão terminológica, parece que o termo “misticismo quântico” deve se referir apenas às visões que aceitam que haja um conhecimento intuitivo, não-racional e não-científico a respeito de dimensões espirituais ou transcendentais da realidade, e que defendem que esse conhecimento primordial tem conexões com a física quântica.

Uma visão distinta defenderia uma abordagem mais racional à questão das ligações entre espiritualidade e física quântica. Participei recentemente como comentador do I Simpósio Internacional Explorando as Fronteiras da Relação Mente-Cérebro (São Paulo, 24-26/09/2010), organizado pelo médico psiquiatra Alexander Moreira-Almeida (U.F. de Juiz de Fora), que usa métodos científicos para investigar estados de paranormalidade. Fiz comentários à apresentação do físico-matemático inglês Chris Clarke e do anestesiológista norte-americano Stuart Hameroff, colaborador do físico Roger Penrose em sua teoria de que a consciência seria um fenômeno essencialmente quântico. Ambos os palestrantes adotam uma postura que se pode chamar “científica”, especulando sobre a natureza da espiritualidade e lançando hipóteses sobre as possíveis conexões com a física quântica. Naturalmente não se trata de teorias bem confirmadas, mas apenas de ideias na busca por uma compreensão da consciência humana, ideias essas que são articuladas de forma racional, e onde as intuições não são consideradas como sendo uma forma de conhecimento pré-científico seguro, mas apenas como hipóteses de trabalho. Neste caso, o termo “misticismo quântico” não se aplicaria corretamente. Como caracterizar então semelhantes abordagens?

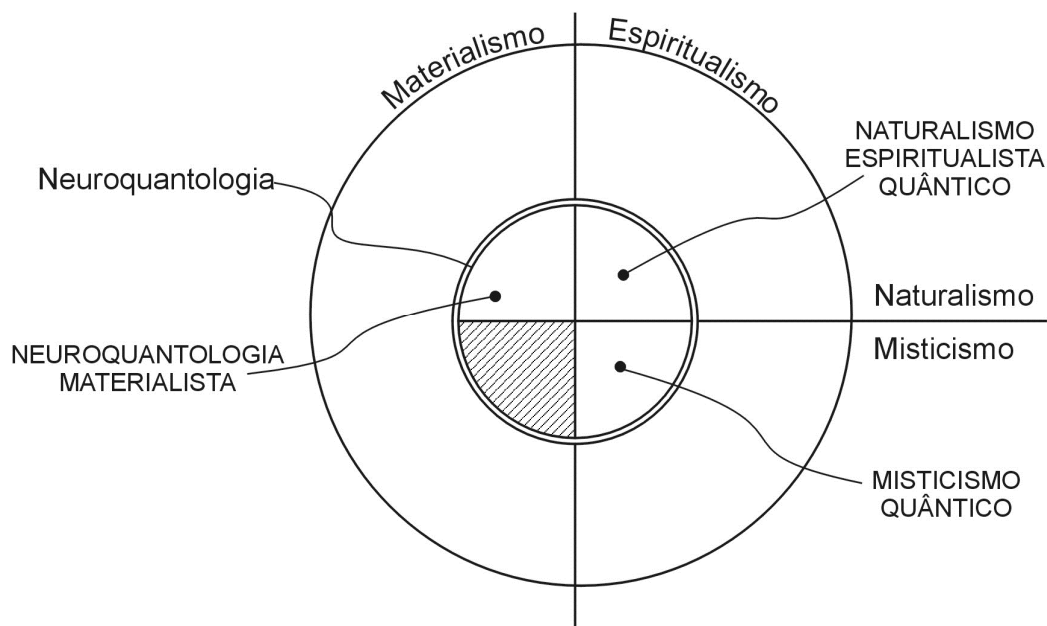
O termo que parece mais interessante e amplo é “espiritualismo”, que tem uma acepção geral que se refere à crença na existência de seres imateriais, como Deus e almas imortais. Trata-se da antítese do materialismo, que considera que a alma ou consciência são frutos da matéria organizada em animais, e que desaparecem na morte do corpo. Há diversas acepções mais restritas de “espiritualismo”, todas contidas na acepção geral. Mencionaremos duas a seguir.

Na história da filosofia, o termo “espiritualismo” designa um movimento idealista da filosofia francesa inaugurado por Victor Cousin, estendido por Maine de Biran, e que foi

posteriormente associado a Henri Bergson e ao filósofo alemão Rudolf Lotze. Essa doutrina eclética espiritualista considerava que a filosofia é, em primeiro lugar, uma análise da consciência, de onde se extraem os dados para a pesquisa filosófica ou científica. Tratava-se de uma tradição próxima ao Cristianismo e politicamente conservadora, e que teve influência no Brasil no séc. XIX, contrapondo-se ao positivismo.

Outra acepção mais específica de “espiritualismo” se refere ao conjunto de crenças e técnicas desenvolvidas em meados do séc. XIX para se “comunicar” com os espíritos dos mortos. Além das transe, utilizavam-se a hipnose e as clássicas sessões em que os mortos se comunicariam através de barulhos, mesas girantes ou outros expedientes. Originado nos Estados Unidos, esse movimento se espalhou pela Europa, atraindo cientistas como William Crookes, Oliver Lodge e Alfred Wallace, e sendo sistematizado na França por Hypolite Rivail, codinome Allan Kardec, no que passou a ser chamado “espiritismo”. Além da existência de espíritos, acredita-se na possibilidade de aperfeiçoamento dos espíritos após a morte, que assim se tornariam guias espirituais dos vivos.

Em suma, definimos uma classe de visões de mundo que chamaremos “espiritualidade quântica”, ou “espiritualismo quântico”, e que englobaria tanto o misticismo quântico quanto um naturalismo espiritualista quântico, sendo que este é mais próxima da ciência e da filosofia analítica. A figura abaixo representa esta classificação. O círculo externo engloba todas as concepções que se preocupam com o espírito, a alma, a mente ou a consciência humana. À esquerda estão as concepções materialistas, e à direita as espiritualistas. Há também uma divisão entre visões naturalistas e visões místicas, que se aplica bem para o espiritualismo. Está claro que uma mesma pessoa pode ter diferentes visões em diferentes ocasiões, ou defender uma mistura entre essas posições. A finalidade do diagrama é ajudar-nos a definir os conceitos filosóficos, e não classificar as opiniões das pessoas de maneira rígida.



O círculo interno delimita as visões que consideram que a física quântica é essencial para explicar ou descrever a alma ou a consciência. A esse conjunto de visões podemos chamar “neuroquantologia”, que é o título de uma revista mencionada no texto 31, “A interpretação transacional”. Notamos no diagrama que há uma “neuroquantologia materialista”, que considera que a física quântica é essencial para explicar como a consciência surge da matéria. Há materialistas e espiritualistas que negam que a física quântica desempenhe um papel essencial na consciência (eles estariam localizados no anel em volta do círculo interior). Aparentemente, não há materialistas místicos quânticos, e mesmo uma posição materialista mística geral parece difícil de articular.

No texto 14, “O que é a ciência ortodoxa?”, o que chamei de “naturalismo animista” identifica-se com o que agora estou chamando naturalismo espiritualista. “Animismo” é a crença, comum a povos primitivos, de que as coisas naturais são todas animadas, ou seja, que elas todas têm alma. Na antropologia, segundo Abbagnano, houve uma discussão de se o homem primitivo se interessava em *explicar* os acontecimentos pela ação de forças animadas (o animismo), ou se ele se voltava para a caça, a pesca e suas festividades fazendo uso da “magia” (sem querer explicar nada). A magia é uma *atividade prática*, que procura dominar as forças naturais com os mesmos procedimentos com que se sujeitam os seres animados.

Um último termo a ser considerado é “ocultismo”, usado por Grim no título da coletânea mencionada acima. Trata-se da crença em fenômenos que se julgam produzidos por forças ocultas, estando associado à magia, astrologia, parapsicologia, etc. Grim considera que este termo é mais neutro do que “pseudociência”, que é pejorativo, e mais amplo do que “paranormalidade”, que tende a se restringir à parapsicologia.

46. Condensados de Bose-Einstein

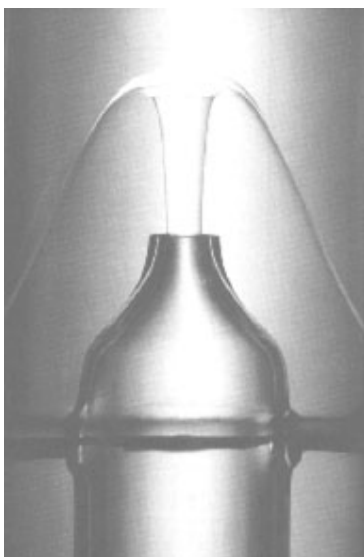
No texto 32, “Quatro aspectos essenciais da física quântica”, mencionamos que uma das características fundamentais da Física Quântica é o peculiar comportamento estatístico das partículas quânticas, e que há duas variedades de comportamento, dependendo se o “spin” da partícula tem valor inteiro (0, 1, 2), caso em que são chamados “bósons”, ou semi-inteiro ($1/2$, $3/2$, etc.), quando são chamados “férmions”.

A estatística dos bósons foi desenvolvida em 1924 pelo físico indiano Satyendra Nath Bose, ao estudar o trabalho que inaugurou a física quântica, escrita por Max Planck em 1900. Bose introduziu uma maneira diferente de contar os estados dos fótons (os quanta de luz), obtendo o mesmo resultado de Planck. Não conseguiu publicar seu trabalho, e portanto resolveu enviá-lo para Albert Einstein, que percebeu seu valor, traduziu-o para o alemão, e garantiu sua publicação.

Einstein começou a explorar a ideia de Bose, e obteve um resultado teórico surpreendente: um conjunto relativamente denso de partículas materiais de um gás, de spin inteiro, quando resfriadas a temperaturas baixíssimas, passam todas a ocupar o mesmo estado quântico. Muitos físicos não aceitaram o resultado, e o próprio Einstein não voltou a tratar do assunto.

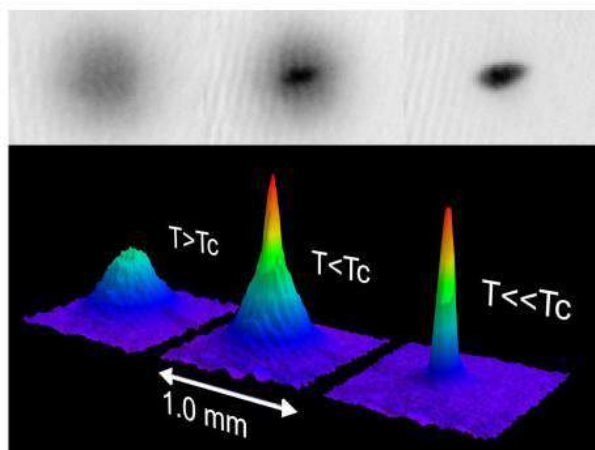
Em 1937, físicos em Moscou (Kapitza) e em Toronto (Allen & Misener) descobriram que o gás hélio, quando resfriado abaixo de 2 graus kelvin, passa a se comportar como um “superfluido”, subindo pelas paredes de um recipiente sem apresentar viscosidade. A figura

abaixo mostra o hélio superfluido jorrando para fora de um recipiente, ao ser aquecido por uma lanterna. Essa foto foi feita por Jack Allen, um dos co-descobridores da superfluidez.



No ano seguinte, Fritz London relacionou o fenômeno com os condensados de Bose-Einstein, que descreveu como uma “função de onda macroscópica”. Na verdade, o hélio superfluido é uma mistura de um condensado de Bose-Einstein com um líquido usual.

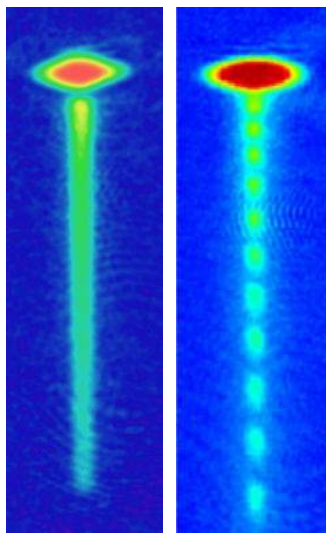
A teoria dos condensados avançou muito, mas só em 1995 é que se produziram os primeiros condensados de Bose-Einstein gasosos puros. Por esta descoberta, Eric Cornell & Carl Wieman, do Colorado, e Wolfgang Ketterle, do MIT em Boston, receberam o prêmio Nobel de 2001. Cornell & Wieman resfriaram átomos de rubídio a 170 nanokelvin (muito frio!). Na figura abaixo, obtida por Ketterle, vemos as fotografias das sombras de um condensado em formação, transformadas abaixo em um gráfico colorido, indicando a densidade de átomos dentro de um volume com lado medindo um milímetro. O número total de átomos é 700 mil. O condensado ainda não se formou à esquerda; na figura central ele começa a se formar, e aparece com clareza no lado direito.



Alguns consideram o condensado de Bose-Einstein como o quinto estado da matéria, junto com sólido, líquido, gás e plasma. Outros, como o físico brasileiro Vanderlei Bagnato – que trabalha na USP de São Carlos, onde se faz muita pesquisa com condensados de Bose-Einstein –, não gostam de chamá-los “o quinto estado da matéria”. Bagnato considera que os condensados permitem uma “visualização” da função de onda quântica Ψ (ou melhor, do seu módulo quadrado) ao longo do espaço, já que cada átomo se encontra no mesmo estado quântico.

Pode-se dizer que as funções de onda dos átomos se superpõem de forma que as partículas perdem sua individualidade (ver texto 24 “Individualidade de partículas quânticas”). A amostra como um todo passa a ser tratada como um único objeto quântico, com propriedades de coerência bem definidas.

Dois desdobramentos da produção de condensados de Bose-Einstein podem ser mencionados. Em 1996, Ketterle obteve pela primeira vez um “laser de matéria”, que consiste de um feixe de átomos com propriedades ondulatórias de coerência semelhantes ao de uma luz laser. O laser de matéria pode também ser usado para a formação de hologramas. Retiramos as imagens seguintes do site do Instituto Max Planck de Munique. À esquerda vemos a imagem de um laser de átomos contínuo, e à direita a interferência entre dois feixes semelhantes.



O outro desdobramento se iniciou com Randall Hulet, de Houston, Texas, que estudou a condensação em gases cujas moléculas se atraem. Ele descobriu que, em certas condições, o condensado pode sofrer uma implosão seguida de uma grande explosão (lembrando uma supernova em estrelas).

47. Análise de um Argumento Místico Quântico

Nas últimas décadas, a noção espiritualista de que a física quântica é relevante para a psicologia, medicina, administração de empresas, etc. difundiu-se bastante na mídia, e se tornou popular em diversas comunidades. Um exemplo bastante radical de tese místico quântica é apresentada no livro e filme *O Segredo*, e chamada de “lei de atração”. Esta tese pode ser reconstruída da seguinte maneira.

Ao entrar em contato com outras pessoas ou ambientes, nossa mente pode entrar em um “emaranhamento quântico” com essas outras mentes ou até com objetos. Mesmo após a separação, o estado emaranhado permanece. Podemos então efetuar uma medição quântica e com isso provocar um colapso não-local da onda quântica emaranhada. O resultado disso é a transformação do estado da outra pessoa ou do ambiente. Dado que na física quântica o observador pode escolher se o fenômeno observado será onda ou partícula, podemos também escolher se o colapso quântico será associado a uma energia positiva ou negativa. Para isso, é preciso treinar as técnicas de pensamento positivo, divulgadas em diversos livros de auto-ajuda quântica. Uma vez que esse segredo é aprendido, pode-se utilizar o pensamento para alterar diretamente a realidade, mesmo à distância, e assim transformar o mundo de uma maneira positiva para nós.

Esse argumento faz uso basicamente de cinco teses:

- i) O cérebro ou a consciência humana é essencialmente quântica.
- ii) Duas consciências podem se acoplar quanticamente, em um estado emaranhado, mesmo estando separados a uma grande distância.
- iii) O colapso quântico é causado pela tomada de consciência do observador.
- iv) No processo de medição, a vontade do experimentador pode escolher se um fenômeno quântico é corpuscular ou ondulatório.
- v) Analogamente, a vontade de um ser humano pode escolher se o outro colapsará para um estado de energia positiva ou negativa.

Dessas teses, a quarta é aceitável, a terceira irrefutável, e a primeira é uma tese empírica, ainda em aberto mas pouco aceita. As teses questionáveis são a segunda e a última. A tese (ii) é justificada argumentando-se que ela explica experimentos de parapsicologia, mas tais experimentos são pouco aceitos na comunidade científica. Já a tese (v) é construída por analogia com a quarta tese, mas tal analogia é falha, conforme explicaremos mais para frente.

Começamos nossa análise com a tese (iii), de que a consciência seria a responsável pelo colapso quântico. Esta afirmação surgiu na década de 1930, e é a tese central da interpretação “subjetivista” da teoria quântica, proposta por London & Bauer (1939), e que examinamos no texto 8, “A Consciência Legisladora”. Apesar de poder parecer estranho atribuir tais poderes para a consciência humana, tal interpretação consegue dar conta de todas as situações experimentais propostas até hoje. Mesmo sendo apenas uma dentre dezenas de interpretações propostas para a teoria quântica, o seu uso pode ser considerado aceitável no argumento em questão.

Examinemos agora a tese (i), segundo a qual o cérebro humano (ou a consciência humana) é essencialmente quântica. Já examinamos diversos partidários desta concepção no texto 15, “A

Consciência é um Fenômeno Quântico?”. O físico e matemático Roger Penrose e o anestesiolologista Stuart Hameroff defendem a tese de que processos essencialmente quânticos, como a manutenção de superposições, ocorreriam dentro de microtúbulos de proteína, presentes em neurônios e em outras células. Esta proposta tem sido criticada porque o calor dentro do cérebro geraria uma rápida destruição da coerência deste hipotético estado quântico. Mesmo assim, surgiu recentemente a primeira evidência convincente de processos essencialmente quânticos curtíssimos em biologia, no processo de fotossíntese em certas algas (ver [aqui](#)).

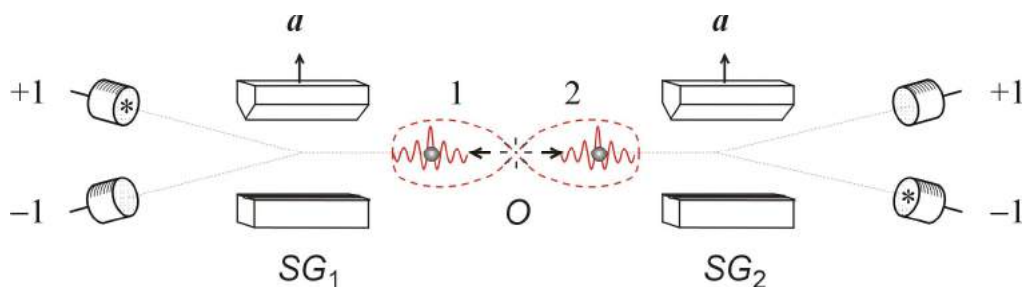
Outra proposta que considera que processos quânticos sejam essenciais para a consciência é a do neurocientista John Eccles, que defendeu que a liberação de neurotransmissores seria um processo probabilístico descrito pela física quântica. Outra ideia que é frequentemente citada é a tese de que um fenômeno quântico semelhante à “condensação de Bose-Einstein” poderia ocorrer no cérebro, conforme proposto por Herbert Fröhlich (1968). E, por fim, podemos mencionar uma abordagem iniciada por físicos teóricos no final da década de 60, em torno de Hiroomi Umezawa, que procura descrever o cérebro com o ferramental da “teoria quântica de campos”.

Que conclusões se podem tirar dessas propostas? Nenhuma delas é bem aceita na comunidade científica, mas o problema de se a consciência é um fenômeno essencialmente quântico ainda está em aberto. Trata-se de uma questão empírica, a ser decidida a partir de experimentos e observações. Mesmo que não se tenham muitas expectativas de que esta tese seja correta, pode-se ao menos considerar aceitável seu uso como hipótese no argumento examinando aqui.

Consideremos agora a tese (ii), que defende que duas consciências podem se acoplar quanticamente, em um “estado emaranhado”, mesmo estando separados a uma grande distância. O que significa isso? Qual a implicação disso?

“Emaranhamento” designa um estado quântico muito especial, envolvendo duas ou mais partículas, que não tem contrapartida na Física Clássica. Já estudamos esse estado nos textos 18, “Teorema de Bell para Crianças”, e 42, “Teste Experimental do Teorema de Bell”. É como se essas duas partículas mantivessem uma certa unidade, ou uma certa simetria, mesmo que separadas a grandes distâncias. Para entendermos um pouco dessa propriedade, consideremos um caso simples propiciado pela situação de “anticorrelação perfeita”, na figura abaixo.

Vemos que um par de partículas foi emitido da posição O , passa por ímãs de Stern-Gerlach orientados na mesma direção a , e é finalmente detectado. Na figura, a partícula da esquerda (de número 1) foi detectada em cima, fornecendo o resultado $I = +1$, enquanto que a partícula da direita (de número 2) foi detectada em baixo, com resultado $II = -1$, oposto ao da outra partícula. A anticorrelação perfeita exprime o fato de que estes resultados são sempre opostos, ou seja, o produto dos resultados é $I \cdot II = -1$. Se o resultado da esquerda tivesse sido diferente, o da direita também seria.



Até aqui, este comportamento não é estranho, podendo ocorrer com partículas clássicas que obedecem a um princípio de conservação. O que é *sui generis*, no caso quântico, é que este comportamento se verifica para *qualquer orientação a* dos aparelhos de Stern-Gerlach! Ou seja, mesmo depois que o par de partículas foi emitido em O , o cientista pode colocar rapidamente os dois aparelhos em qualquer orientação que ele queira (com a mesma orientação para o par de aparelhos), e o que se observará será a anticorrelação perfeita.

Esta propriedade de anticorrelação perfeita para todos os ângulos não pode ser obtida classicamente. Em 1964, John Bell generalizou este resultado, mostrando que “teorias realistas locais” não conseguem dar conta dos resultados estatísticos de experimentos quânticos. Ou seja, se supormos que é real a onda quântica que sofre colapsos, este colapso terá que ser instantâneo e não-local.

Será que um semelhante estado emaranhado pode ocorrer para cérebros humanos, ou entre mentes humanas, como defende a tese (ii)? Será que isso poderia explicar as controvertidas alegações parapsicológicas de telepatia?

Não há a menor evidência científica de que cérebros possam se acoplar em um estado emaranhado. Mesmo que a tese (i) seja verdadeira, e que partes restritas do cérebro pudessem entrar em uma superposição quântica, não há mecanismo concebível, de acordo com a física atual, que levasse a um acoplamento e consequente emaranhamento entre cérebros de diferentes pessoas, em situações do cotidiano.

A única saída para o místico quântico seria postular que uma mente humana quântica transbordasse para fora do cérebro material, estabelecendo assim um acoplamento com uma outra mente, que sairia do cérebro de outra pessoa. Mas a esta altura já nos distanciamos demais da ciência aceita atualmente, e entramos no terreno da especulação metafísica. Sem qualquer evidência concreta de que tal fenômeno ocorra, salvo alegações controvertidas de que a telepatia foi medida em experimentos controlados, podemos considerar esta tese um dos pontos mais frágeis do argumento místico quântico.

A tese (iv) usada no argumento místico quântico diz que, no processo de medição, a *vontade* do experimentador pode escolher se um fenômeno quântico é corpuscular ou ondulatório, mesmo depois que o objeto quântico já tenha entrado na aparelhagem experimental. Este “experimento de escolha demorada” foi proposto pela primeira vez por Carl von Weizsäcker em 1931, baseado na descrição teórica do “microscópio de raios gama”, usado por seu orientador, Werner Heisenberg, para derivar o princípio de incerteza quântico. Porém, neste caso envolvendo duas partículas emaranhadas, não se pode fazer o comportamento de uma

das partículas se enquadrar no caso ondulatório (exibindo franjas de interferência) (ficaremos devendo uma explicação para este caso de “apagador quântico”).

Um experimento semelhante pode ser ilustrado com o par de partículas emaranhadas da figura acima. Se a partícula número 1 for encontrada no detector de cima (ou de baixo), dizemos que após o experimento ele tem “spin” na direção $+z$ (ou $-z$). Devido à anticorrelação perfeita, a partícula número 2 terá respectivamente spin na direção $-z$ (ou $+z$). Por outro lado, já mencionamos que a anticorrelação perfeita se mantém para todas as direções em que o aparelho é colocado.

Girando ambos os aparelhos, de forma que eles fiquem fora do plano da página, eles estarão orientados na direção x . Os possíveis resultados para as medições de spin são análogos ao caso anterior, só que agora uma medição na partícula 1 que fornece spin $+x$ (ou $-x$) corresponderá a um estado final na partícula 2 respectivamente de $-x$ (ou $+x$).

O ponto agora é que a vontade do cientista, com relação a qual observável ele quer medir na partícula 1 (spin z ou spin x), determina instantaneamente o tipo de estado para a partícula 2 (spin z ou spin x). Porém, o cientista não consegue controlar o *resultado* de cada medição, ou seja, no caso de escolha do spin na direção x , não consegue controlar se o resultado será $+x$ ou $-x$.

Em consequência disso, o cientista não pode transmitir informação instantânea para seu colega que mede, à distância, as propriedades da outra partícula. O primeiro cientista pode escolher medir spin na direção z ou na direção x , mas isso não afetará a estatística de resultados obtida pelo outro cientista. A demonstração disso é conhecida como “prova de impossibilidade de comunicação superlumínica”, e foi discutida no texto 26, “Astrobígobaldo quer Informação Instantânea”.

Podemos agora aplicar esta análise no argumento místico quântico. Escolher se o fenômeno associado à partícula distante será corpuscular ou ondulatório, ou se o estado final terá spin z bem definido ou spin x bem definido, não pode gerar nenhuma previsão sobre o resultado da medição efetuada à distância. Analogamente, mesmo que fosse possível para duas mentes humanas se acoplarem em um estado emaranhado, e que um dos sujeitos pudesse escolher qual observável ele pretende medir, a sua decisão não poderia ser conhecida pelo outro, mesmo após o colapso da onda.

No argumento místico-quântico, a tese (v) pressupõe que incutir energia positiva em um objeto distante seja um estado de coisas *distinguível* da situação em que uma energia negativa é incutida. Mas se forem situações distinguíveis, a escolha não poderia ser controlada pela vontade de uma mente à distância, pois, senão, poder-se-ia transmitir informação sobre o estado energético escolhido de maneira instantânea, o que violaria a prova de impossibilidade de comunicação superlumínica. Além disso, dado que a tese (v) foi elaborada como uma analogia à tese (iv), esperar-se-ia que a vontade do sujeito teria que ser exercida modificando alguma parte de um equipamento macroscópico, como um boneco de vodu, e não apenas através do pensamento.

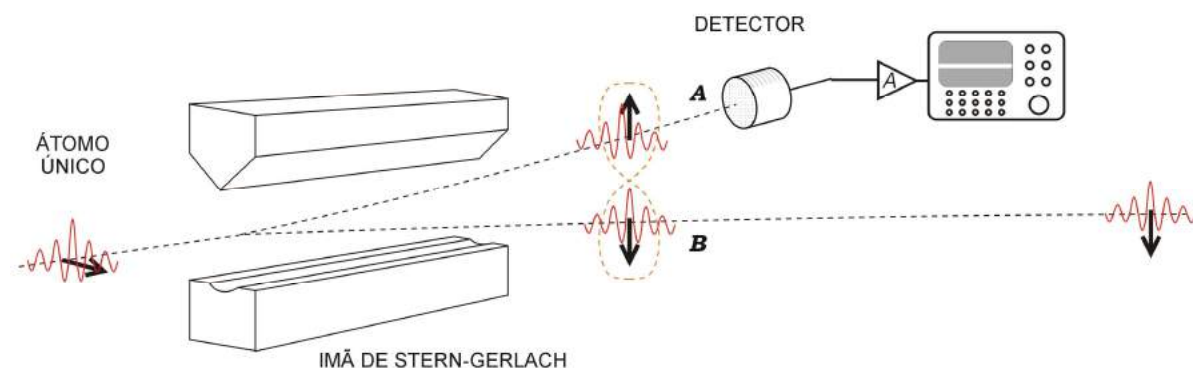
Em suma, a tese (iv) do argumento é correta, mas a sua extensão à tese (v) é inaceitável. Controlar a energia associada a um ambiente ou a outra pessoa resulta em consequências macroscopicamente observáveis, ao contrário do que acontece na tese (iv), em que a escolha do observável sendo medido por um cientista em uma partícula de um sistema emaranhado não pode ser descoberto pelo cientista medindo a outra partícula.

Em conclusão, o argumento místico quântico associado ao livro *O Segredo* falha principalmente em dois pontos, que chamamos de tese (ii) e (v): mentes humanas não podem se acoplar quanticamente em um estado emaranhado, e mesmo se pudessem, uma não poderia controlar atributos macroscópicos da outra.

48. Experimento de Resultado Nulo

Um tipo de experimento bastante interessante e simples que pode ocorrer na Física Quântica é uma medição que fornece informação sem absorção de energia pelo detector.

Consideremos o experimento de Stern-Gerlach, que vimos no texto 6, “Onde está o Átomo de Prata?”, que pode fornecer dois resultados possíveis: detecção “em cima”, no caminho A, ou detecção “em baixo”, no caminho B. Suponha agora que o detector do caminho de baixo é removido, como na figura abaixo.



Sabendo que um átomo único adentrou o ímã de Stern-Gerlach, pode acontecer que nada seja detectado no detector do caminho A. Neste caso, supondo que o detector é 100% eficiente, inferimos que o átomo está localizado no caminho B. Isso corresponde a uma medição, houve uma redução do estado inicial superposto ($A+B$, antes da detecção) para o estado B, e “adquiriu-se informação”, no sentido de que a partir deste resultado podemos fazer previsões mais precisas no futuro (ou seja, sabemos o que acontecerá se um medidor for colocado mais adiante no caminho B). No entanto, não houve transferência de nenhum quantum de energia para o aparelho de medição, ou seja, o detector não disparou e nem se produziu um registro macroscópico no aparelho. Tal situação é conhecida como “medição de resultado nulo” ou “de resultado negativo”.

O aspecto peculiar deste tipo de medição foi apontado pela primeira vez pelo alemão Mauritius Renninger, em 1960, para criticar a interpretação ortodoxa da Física Quântica, que afirma que toda medição provoca um distúrbio no objeto quântico, como é comumente exemplificado pelo princípio de incerteza. Na figura acima, porém, vemos que a onda quântica está inicialmente espalhada entre os dois caminhos, e há um contato entre a parte da onda correspondente à posição A e o detector, logo antes do colapso da onda para o estado B.

Assim, numa interpretação realista ondulatória, há uma interação entre o objeto quântico e o aparelho de medição, apesar de não haver transferência de um quantum.

Esta crítica de Renninger pressupõe uma interpretação corpuscular do objeto quântico. Isso é consistente com a interpretação da complementaridade, que caracteriza este experimento como um fenômeno corpuscular (pois há uma trajetória bem definida). Neste caso, portanto, não teria havido interação entre a partícula e o detector. Werner Heisenberg, porém, sentiu-se incomodado com a crítica de seu compatriota Renninger, e argumentou que em tal experimento era preciso levar em conta a “totalidade” do fenômeno, de maneira semelhante a que Bohr respondera a EPR (ver texto 29, “O Paradoxo de EPR”). Ou seja, neste caso Heisenberg estava negando uma interpretação puramente corpuscular. (Renninger, na verdade, tinha uma visão dualista realista, como Willy de Baere salientou em um artigo de 2005, disponível na internet.)

Em 1966, o experimento de resultado nulo foi usado pelo brasileiro Klaus Tausk para criticar uma teoria da medição quântica formulada por Daneri, Loinger e Prosperi, e divulgada por Leon Rosenfeld. Este último afirmou que a teoria dos três italianos mostrava que a amplificação seria necessária para a redução (colapso) do estado quântico. Tausk argumentou corretamente que o experimento de resultado nulo mostrava que pode haver colapso sem amplificação. Os italianos se defenderam argumentando (conforme mencionamos acima para a interpretação ondulatória) que há interação da onda quântica com o aparelho, mesmo sem resultar em um disparo do aparelho. Contarei a interessante história desse físico brasileiro em outra oportunidade.

Em 1981, o grande físico Robert Dicke examinou em detalhes outro exemplo de experimento de resultado nulo, envolvendo um átomo dentro de uma caixa que está dividida em dois compartimentos. O estado inicial do sistema é uma superposição de estados bem localizados em cada um dos compartimentos. Irradia-se o compartimento esquerdo com fótons; se nenhum espalhamento for observado, ocorre um colapso do estado de posição do átomo para o compartimento da direita, sem haver detecção de fótons. Um fato paradoxal aqui é que este estado final (átomo mais fóton) pode ter mais energia do que o estado inicial! Dicke mostrou, contudo, que este aumento é compensado pela diminuição de energia que ocorre quando o fóton é espalhado, de forma que a energia média é conservada.

Outro ponto importante salientado por Dicke envolve um esclarecimento da afirmação de Renninger de que “nenhuma interação” ocorreria em um experimento de resultado nulo:

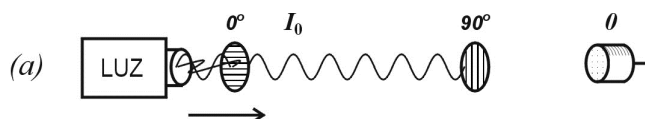
“Mostra-se em teoria de perturbação da mais baixa ordem que esta redução da probabilidade de que o átomo se encontre no lado esquerdo da caixa está associada a um processo de espalhamento de segunda ordem. [...] O processo de espalhamento de segunda ordem é um no qual um fóton é primeiro absorvido pelo átomo e depois emitido de volta no pacote de onda, deixando o campo de fótons no estado original. [...] A ausência de um fóton espalhado não implica que uma ‘interação’ entre o pacote de onda do fóton e o átomo não tenha ocorrido, pois o processo de espalhamento de segunda ordem pode ser considerado uma ‘interação’.” (*Foundations of Physics* 16, 1986, pp. 109-10.)

O experimento de resultado nulo está presente em vários contextos dos fundamentos da física quântica, como no efeito Zenão quântico (ver texto 28) e no “efeito prateleira óptica” (Porrati & Putterman, *Physical Review A*, 1987, p. 929-32).

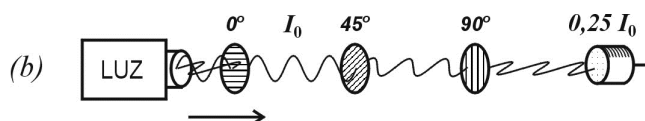
49. Um obstáculo pode aumentar o vazamento?

A luz é uma onda que se propaga no vácuo, oscilando de maneira transversal à sua propagação. Se alguém mira uma pequena lanterna em seus olhos e você vê um ponto de luz, esta luz que chega aos seus olhos pode estar oscilando na horizontal ou na vertical. Estas duas direções determinam dois planos de polarização linear da luz, que podem ser indicados como 0° e 90° . A polarização pode também se dar em uma direção intermediária entre essas, e pode também envolver componentes circulares, que ignoraremos aqui.

A luz que sai de uma lâmpada incandescente está numa mistura de estados de polarização. Uma maneira simples de gerar luz polarizada em uma única direção (por exemplo 0°) é fazê-la passar por um *filtro polarizador*. Se fizermos a luz passar por um outro filtro polarizador em uma direção ortogonal (90°), nenhuma luz passará. Isso está representado na Figura (a), abaixo, onde à direita há um detector que não mede nada.



Em 1979, Gary Zukav publicou um livro de divulgação de física moderna, *The Dancing Wu Li Masters* (não traduzido), que contribuiu bastante para atual popularidade do misticismo quântico, conforme já mencionamos no texto 38 ("As Origens Hippie do Misticismo Quântico"). Na pg. 268, ele apresenta o que no seu sumário chamou de "paradoxo do terceiro polarizador", e que consiste no fato de que se um terceiro polarizador, orientado em uma direção intermediária entre 0° e 90° , como 45° , for colocado *entre* os dois anteriores, então $\frac{1}{4}$ da luz que atravessou o primeiro polarizador será transmitida ao final (Fig. b).



Isso é de certa forma estranho. Pois eu coloco um obstáculo na passagem da luz, que deveria bloqueá-la ainda mais, mas o efeito é aumentar a passagem da luz! É como se na chuva eu abrisse meu guarda-chuva e passasse a me molhar ainda mais!

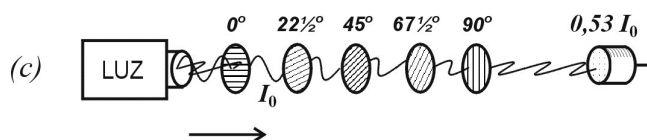
Zukav utiliza este exemplo para argumentar que a lógica da física quântica é diferente da lógica clássica, seguindo as ideias de David Finkelstein. De acordo com seu raciocínio, a luz que sai da fonte seria uma entidade única, com propriedades que se manteriam as mesmas até o final. Se esta entidade não tem a capacidade de passar por dois polarizadores (Fig. a), como é que ela poderia ter a capacidade de passar por três (Fig. b)? Zukav argumenta que a nossa incapacidade de entender essa situação está ligada ao fato de usarmos um raciocínio lógico inapropriado, de usarmos a "lógica clássica".

No entanto, não é difícil entender esta situação, mesmo usando nossa lógica habitual. O ponto é que as propriedades da luz se *alteram* à medida que ela vai passando pelos polarizadores. Após o primeiro polarizador da Fig. (b), a luz tem uma propriedade bem definida, que é polarização 0° ; após passar pelo segundo polarizador, parte da luz é absorvida pelo filtro, e a parte que é transmitida tem uma nova propriedade bem definida, um novo “elemento de realidade”: polarização a 45° . E ao passar pelo terceiro polarizador, novamente o estado da luz é alterado.

Vemos assim que o paradoxo apontado por Zukav não é difícil de entender, fazendo parte do arcabouço conceitual da Física Ondulatória Clássica. Um obstáculo pode aumentar o vazamento!

É interessante que esta propriedade, de um obstáculo aumentar a passagem da luz, foi usada por Marshall, Santos & Selleri (1983) para elaborar uma teoria de variáveis ocultas local, consistente com os resultados experimentais da Física Quântica (isso foi mencionado no texto 42, “Teste Experimental do Teorema de Bell”).

Notem, na Fig. (c) abaixo, o que acontece se colocarmos mais dois polarizadores com orientações intermediárias, no arranjo anterior:

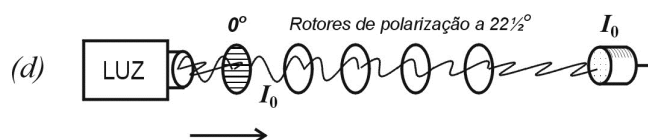


A fração da luz que chega ao detector aumenta! Será que podemos ir inserindo polarizadores, até que 99% da luz chegue ao final? Sim, claro!

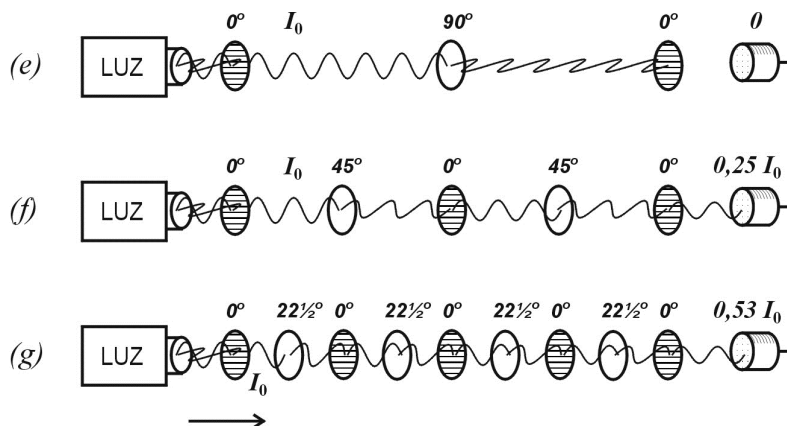
Para calcular a fração da luz que é transmitida por um filtro polarizador, usa-se a lei de Malus: multiplica-se a intensidade do feixe inicial pelo quadrado do cosseno do ângulo (entre os planos de polarização inicial e final). Por exemplo: considere o feixe inicial de intensidade I_0 , polarizado a 0° ; ao passar pelo polarizador orientado a $22,5^\circ$, o que sobra tem intensidade proporcional a $\cos^2(22,5)$, ou seja, 85% da intensidade inicial I_0 .

Para que o feixe final tenha mais que 99% de intensidade do feixe inicial, basta usar 246 polarizadores, cada qual girado por um ângulo de $0,366^\circ$ em relação ao anterior. Quanto maior o bloqueio, maior a transmissão! (Claro, usando ângulos adequados...)

O resultado final dos processos mencionados acima é girar o plano de polarização da luz em 90° , sempre com perdas. É possível fazer isso sem perdas, usando uma substância opticamente ativa como uma solução de açúcar, ou um rotor óptico envolvendo “birrefringência”. Na Fig. (d), efetua-se uma rotação de 90° por meio de quatro rotores de $22,5^\circ$. Neste caso, a intensidade final é igual à inicial.



É interessante combinar o uso de filtros e rotores, como nas figuras abaixo:



Nestes casos, os filtros estão fixados em 0° , de forma que a luz transmitida ao final está sempre polarizada a 0° . Os rotores introduzem uma rotação total de 90° , mas em cada passo essa rotação total é dividida em rotações parciais. Como anteriormente, a intensidade de luz transmitida vai aumentando à medida que novos componentes ópticos são introduzidos.

Esta situação é um exemplo do efeito Zenão quântico, que vimos no texto 28 (“O Efeito Zenão Quântico”). Para isso, deve-se considerar que a ação dos polarizadores seja uma medição, e que a transição de estado (introduzida pelos rotores) não seja contínua, mas discreta. A observação frequente (casos f e g) mantém a luz não-absorvida no estado original, e à medida que a observação se torna contínua, todos os fótons detectados terão a polarização inicial, sem perdas.

Usaremos este resultado para explicar como é possível cutucar uma bomba ultra-sensível sem fazê-la explodir!

50. Como cutucar uma Bomba sem fazê-la explodir?

Imagine uma bomba ultra-sensível, que explode ao absorver apenas um único quantum de energia. Como assim?

Sabemos que a luz é sempre detectada ou observada na forma de “fótons” ou “quanta de luz”, que são quantidades de energia discretas de valor hf , onde f é a frequência da luz e h a constante de Planck. Os fótons também são sempre medidos de forma pontual, como vimos no texto 4 “A Primeira Lição de Física Quântica”.

Uma célula de bastonete de nossa retina pode gerar um sinal com um único fóton de luz visível, mas nosso cérebro só percebe o sinal conjunto se pelo menos 9 bastonetes dispararem em um intervalo de 100 milissegundos. Há também instrumentos sensíveis a um único fóton, conhecidos como “fotomultiplicadores”, ou, mais recentemente, “fotodiodos de avalanche”. O fotodiodo mais sensível já construído tem uma eficiência de 76%, o que significa que de cada quatro “pacotes monofotônicos” que passam por ele, três são detectados na forma de fótons.

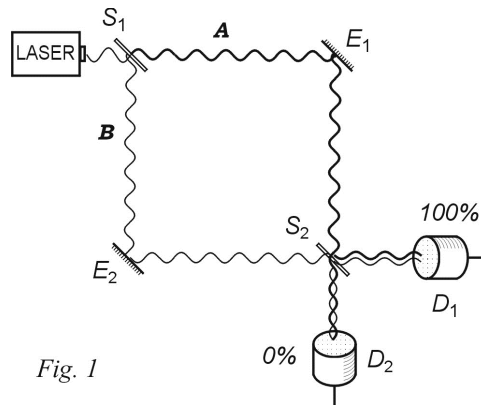
Êpa: por que eu não escrevi “de cada quatro *fótons*, três são detectados”? Porque a definição de fóton requer que ele já tenha sido detectado ou observado (é um termo observacional). Sobre o que acontece *antes* da detecção, só temos “interpretações”, e não certezas. Para algumas interpretações, o fóton bem localizado só se forma durante o processo de medição; para outras, ele já existe antes da detecção. O termo “pacote monofotônico” é um termo teórico aceito por todas as interpretações, que designa um pacote de onda luminoso que tem a potencialidade de gerar um sinal único em um fotodiodo 100% eficiente (instrumento este que não existe).

Voltemos agora para a bomba ultra-sensível. Esta seria uma bomba que está acoplada a um fotodiodo que dispara com a detecção de um único fóton. Agora vem uma descoberta surpreendente relacionada com a Física Quântica: é possível, na maior parte das vezes, saber que temos uma bomba ultra-sensível em algum lugar, usando apenas uma lanterna, e sem fazê-la explodir! Por que isso seria surpreendente? Por que, de acordo com a Física Clássica, eu só posso observar um objeto se eu trocar energia com ele.

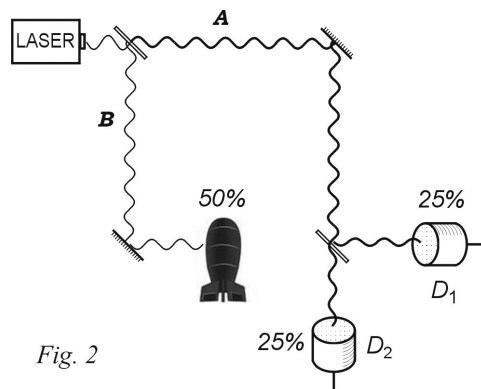
Por exemplo, até o início de 2011, os astrônomos já tinham identificado 519 planetas em torno de outras estrelas, que não o nosso Sol. Uma das técnicas usadas para a detecção desses planetas é o método de trânsito, que mede pequenas variações no brilho da estrela, devido à passagem do planeta em frente dela. Os astrônomos só podem observar o planeta porque ele absorveu uma pequena parcela da luz da estrela: sem essa troca de energia, o planeta não seria observável.

Se tentássemos observar a bomba ultra-sensível identificando sua sombra, fazendo uma varredura com o feixe da lanterna, ela explodiria no momento em que a luz tocasse nela. Mas não queremos que ela expluda. Qual a solução?

Em 1993, Elitzur & Vaidman propuseram colocar a bomba em um braço do interferômetro de Mach-Zehnder, que vimos no texto 13, “A Escolha Demorada”. A Figura 1, abaixo, apresenta um diagrama do interferômetro. Lembremos que, nos espelhos semi-refletores S1 e S2, o feixe incidente é dividido em dois componentes de mesma amplitude. Vemos que todo o feixe de luz que sai do laser acaba incidindo no detector D1, pois no caminho do detector D2 (após S2) ocorre interferência destrutiva dos feixes que vieram pelos caminhos A e B. Ou seja, nesta situação nenhum fóton é detectado em D2.



Considere agora que a bomba ultra-sensível é inserida no caminho B, como na Figura 2, abaixo:



O feixe que rumo pelo caminho B acaba sendo absorvido pela bomba, que neste caso explodiria. Este caso corresponde ao destino de 50% dos fótons. Já o componente que rumo pelo caminho A acaba se dividindo entre os dois detectores D1 e D2, cada qual com 25% do feixe. Não há interferência destrutiva, como no caso anterior.

Considere agora a emissão de um único pacote monofotônico do laser. A proposta de Elitzur & Vaidman é que se pode distinguir as situações das Figuras 1 (sem bomba) e 2 (com bomba), examinando-se onde aparece o fóton. Obviamente a bomba só pode explodir no caso da Fig. 2; mas mesmo nesta segunda figura, há uma probabilidade de 25% de o fóton aparecer em D1, e 25% em D2 (sem que a bomba exploda).

Vamos supor que não sabemos se a bomba está colocada ou não. Se detectarmos o fóton em D1, não podemos ter certeza se estamos na situação da Figura 1 ou 2 (ou seja, se a bomba foi colocada ou não). Mas se o fóton for detectado em D2, aí sim podemos ter certeza que a bomba foi colocada no interferômetro! E isso ocorre sem que a bomba exploda, ou seja, sem que um fóton seja absorvido pela bomba!

Em outras palavras, em $\frac{1}{4}$ dos casos *em que há bomba* é possível detectar a presença da bomba sem que haja explosão! Em $\frac{1}{2}$ desses casos há explosão, e no outro $\frac{1}{4}$ de casos não podemos ter certeza de nada.

Se tivermos vários sistemas, com e sem bombas (em igual número), a probabilidade de detecção da bomba sem explosão cai pela metade, assim como a probabilidade de explosão. Ou seja, no *caso geral* (igual número de sistemas com e sem bombas), a detecção em D2 ocorre em $\frac{1}{8}$ dos casos, e a explosão em $\frac{1}{4}$ deles.

Até aqui, nada de muito surpreendente. São interessantes aqueles casos em que a bomba é detectada sem explosão, mas em compensação a bomba explodiria em um número de casos duas vezes maior, o que pode não ser muito útil se estivermos por perto.

Mesmo assim, vamos examinar mais de perto a situação em que detectamos a bomba sem fazê-la explodir. Esta situação foi chamada de “medição sem interação”, mas será que não houve mesmo uma “interação”? Afinal de contas, o que é uma “interação”? Uma situação parecida já foi encontrada no texto 48, “Experimento de Resultado Nulo”, em que provoca-se um colapso da onda quântica sem que haja amplificação do sinal, e o estado final da partícula é conhecido sem que houvesse “interação” com o aparelho de medição. No entanto, mencionamos nesse texto que o significado da palavra “interação” é ambíguo. O que temos, claramente, é uma medição “sem troca de um quantum de energia”. Mas, segundo algumas interpretações, como a ondulatória realista, logo antes do colapso há sempre uma espécie de “interação” entre a onda quântica e o aparelho de medição, no sentido de que as ondas quânticas dos dois sistemas ocupam simultaneamente a mesma região do espaço, logo antes do colapso.

Vemos assim que a expressão “medição sem interação” é ambígua, e tem embutida uma interpretação da Teoria Quântica. Seria melhor chamá-la de “medição sem troca de quanta” (ou mais precisamente, sem troca resultante de quanta – *measurement without a net exchange of quanta* – devido à citação feita por Dicke no texto 48).

O experimento de Elitzur & Vaidman é diferente do experimento de resultado nulo (do texto 48) porque eles utilizam este tipo de experimento para detectar a presença de um objeto macroscópico, sem trocar energia. Mas essa ideia é meio chocha, pois no caso geral ela só dá informação segura em $\frac{3}{8}$ dos casos, sendo $\frac{2}{8}$ com explosão e apenas $\frac{1}{8}$ sem explosão.

Foi aí que um resultado espetacular foi obtido por Kwiat, Weinfurter, Herzog, Zeilinger & Kasevich, em 1995, na Universidade de Innsbruck, na Áustria. A ideia, originada com Kasevich, foi juntar a análise de Elitzur & Vaidman com o efeito Zenão quântico, que vimos no texto 28 (“O Efeito Zenão Quântico”).

No nosso último texto (de número 49), “Um obstáculo pode aumentar o vazamento?”, discutimos como o efeito Zenão quântico pode ser implementado com polarizadores. Retomamos aqui aquela discussão, indicando uma outra maneira de implementar os mesmos efeitos, substituindo o polarizador por um dispositivo óptico diferente, chamado “divisor-de-feixe polarizador”. Este dispositivo combina a ação do espelho semi-refletor S1 e do rotor polarizador, dividindo o feixe de luz sem perdas, sendo que o componente refletido adquire uma polarização ortogonal ao feixe inicial.

Na parte de baixo da Fig. 3, temos um interferômetro de Mach-Zehnder com dois divisores-de-feixe polarizadores P1 e P2. A luz, após passar por um polarizador inicial a 0° , passa a ter

intensidade I_0 (que será a nossa referência). Em seguida, um rotor gira o plano de polarização para $22\frac{1}{2}^\circ$, ângulo este que escolhemos para traçar a analogia com a discussão sobre polarizadores. O divisor-de-feixe polarizador P_1 divide a luz em um componente com polarização a 0° e outro a 90° (no caso, as intensidades desses componentes serão diferentes). O divisor P_2 recombina os feixes, e o feixe retorna para a polarização de entrada, qualquer que ele tenha sido (no caso, era $22\frac{1}{2}^\circ$).

A parte de cima da Fig. 3 apresenta um sistema equivalente a esse, sem os divisores-de-feixe polarizadores. Em ambos, ao final teremos luz polarizada a $22\frac{1}{2}^\circ$ com intensidade I_0 .

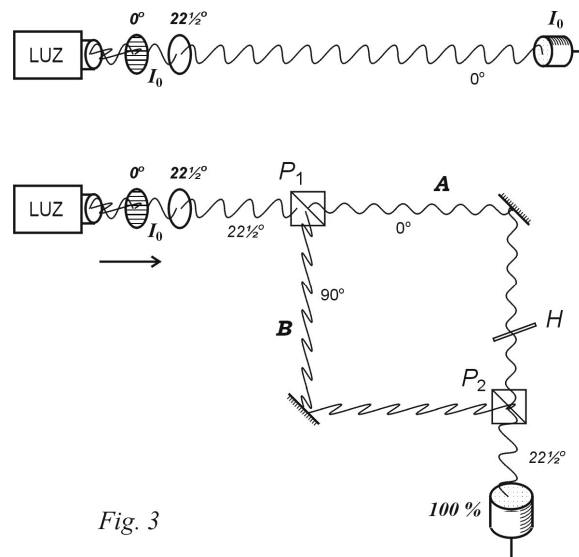


Fig. 3

Comparando com a Fig. 1, vemos que a única diferença é que ao final todos os fótons são detectados em D2, e nenhum em D1. A lâmina transparente H é usada apenas para ajustar a fase do feixe A, para garantir que ao final o plano de polarização seja igual ao inicial ($22\frac{1}{2}^\circ$).

Na Fig. 4, apresentamos o mesmo tipo de analogia para o caso em que há um obstáculo (a bomba) no caminho B do interferômetro. Notamos que o efeito de inserir o obstáculo, na parte inferior da figura, é igual ao de introduzir um polarizador orientado a 0° , na parte superior da figura. Isso faz com que o feixe final esteja agora polarizado a 0° , e a intensidade abaixe para $0,85 \cdot I_0$.

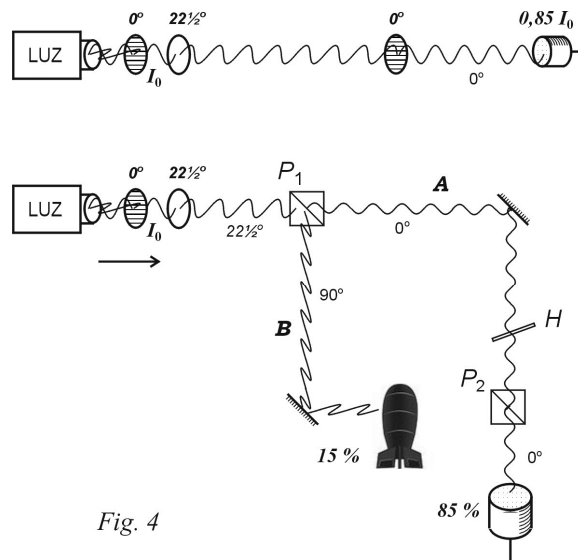


Fig. 4

Para chegarmos na situação em que há “medição sem interação” com uma eficiência maior do que nas Figs. 1 e 2, devemos fazer o feixe final voltar para a entrada do interferômetro.

Na Fig. 5 isso é feito sem a presença da bomba (sem polarizadores na parte de cima da figura), onde o número de vezes que a luz percorre o interferômetro é $n=4$. Assim, quando o pacote de onda sai do interferômetro, ao final (retirando o espelho E3), a polarização do feixe é de 90° , sem perdas de luz.

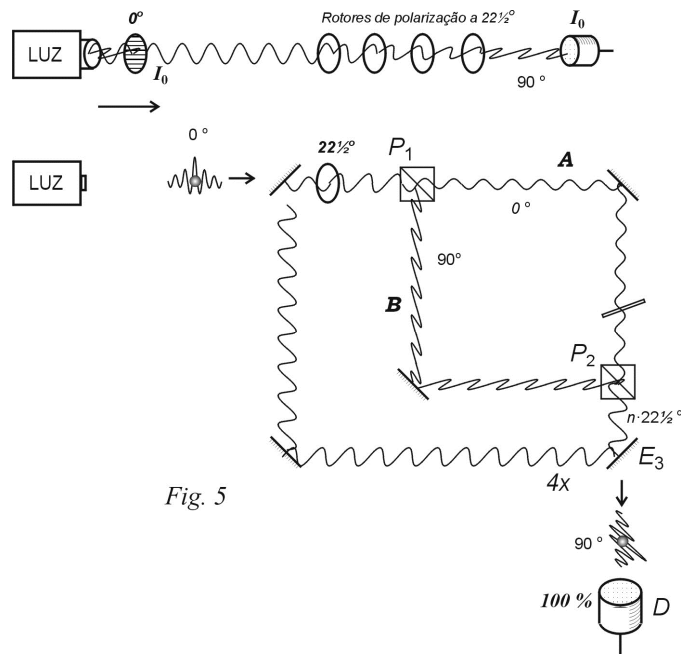


Fig. 5

Comparemos com a situação em que a bomba é inserida (Fig. 6):

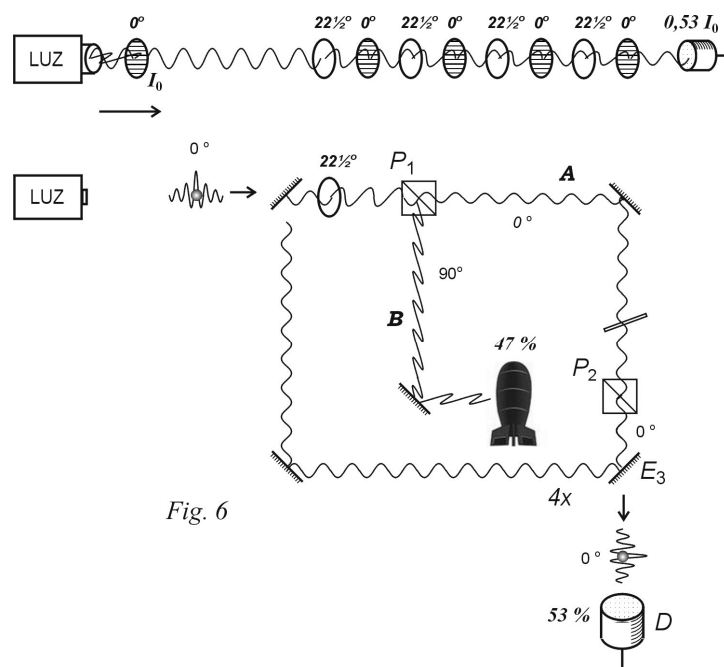


Fig. 6

Agora, a polarização final do feixe é 0° , o que é facilmente distinguível da situação sem bomba (Fig. 5). O único problema é que a bomba explode em 47% dos casos da Fig. 6, o que já um pouco melhor do que os 50% da Fig. 2.

Mas agora basta aumentar o número de voltas do feixe. No texto 49, vimos que se usássemos $n=246$ pares de polarizadores-rotores (ao invés dos 4 do topo da Fig. 6), colocados a um ângulo de $0,366^\circ$ (ao invés de $22\frac{1}{2}^\circ$), a intensidade final do feixe subiria para 99%! Ou seja, no caso do interferômetro, se o rotor for colocado a $0,366^\circ$ e o feixe der 246 voltas, em apenas 1% dos casos a bomba explodiria!!

Ou seja, no caso geral, se fôssemos testar 200 situações (equiprováveis) em que pode ou não haver uma bomba, saberíamos a resposta em 199 casos, e em apenas 1 haveria uma explosão. Nada mal!

A explicação original deste experimento pode ser encontrada no texto “The Tao of Interaction-Free Measurements”, de Paul Kwiat, disponível em:

<http://web.archive.org/web/19990222174102/www.p23.lanl.gov/Quantum/kwiat/ifm-folder/ifmtext.html> .

51. Os Neutrinhos

Dentre as dezenas de livros que exploram o misticismo quântico, há um escrito por Victor Mattos, intitulado *Medicina quântica* (Editora Corpo e Mente, Curitiba, 2001):

“[...] está em pleno desenvolvimento a medicina quântica integral com sua metodologia holística de abordagem do ser humano como um todo, dentro de uma totalidade, como um universo dentro de outro mais abrangente: o universo cósmico” (p. 34).

Tal abordagem não é levada a sério pela ciência estabelecida, e única justificativa para uma medicina quântica seria que suas técnicas agem por “efeito placebo” (ver texto 19, “Naturopatia, Teoria Quântica e o Efeito Placebo”).

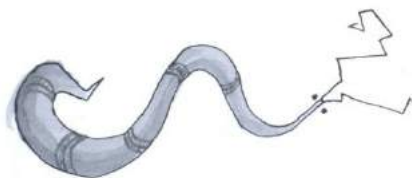
Uma ideia curiosa apresentada neste livro é que nosso corpo seria afetado por campos de “neutrinos”:

“O organismo humano possui um campo quântico, formado por subpartículas atômicas denominadas neutrinos. À primeira vista, isto parece uma afirmação estranha e fantasiosa, mas pode ser comprovada, e o estudo acurado da física quântica fornecerá os subsídios teóricos necessários ao seu entendimento. As características deste campo quântico podem ser assim resumidas em três características principais: 1) É monopolar [...] 2) O campo é predominantemente neutrínico [...] 3) O campo neutrínico não interage com campos eletromagnéticos” (p. 60).*

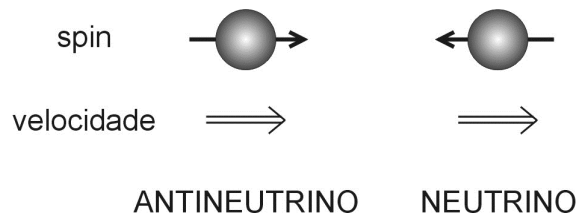
Não há dúvidas de que se trata de uma afirmação estranha e fantasiosa!

Os neutrinos foram propostos teoricamente em 1930 por Wolfgang Pauli, como forma de satisfazer o princípio de conservação de energia, quando um núcleo radioativo emite um elétron (chamado radiação beta), convertendo um nêutron em um próton. “Neutrino”, nome dado pelo italiano Enrico Fermi para esta partícula sem carga elétrica, significa simplesmente neutrinho.

Uma excelente introdução a esse assunto é o livro de Maria Cristina Abdalla, *O discreto charme das partículas elementares* (Editora Unesp, 2004). Neste livro, cada partícula elementar é desenhada pelo ilustrador Sergio Kon com um monstrinho fofo. O neutrino aparece da seguinte maneira:

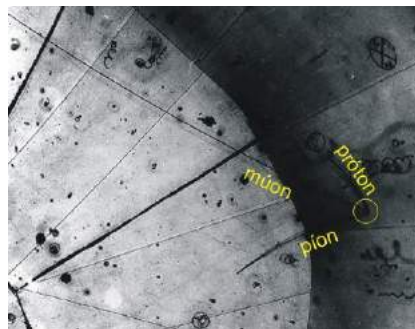


Está claro que o neutrino não é como uma lesma, ele é mais como um pontinho que tem spin- $\frac{1}{2}$, o que significa que se comporta como um ímã (dado que sua massa não é nula). Na figura abaixo, representa-se o neutrino como uma bolinha carregando uma flecha, que indica o seu spin. O neutrino carrega seu spin no sentido oposto à sua velocidade, já no antineutrino o sentido é invertido.



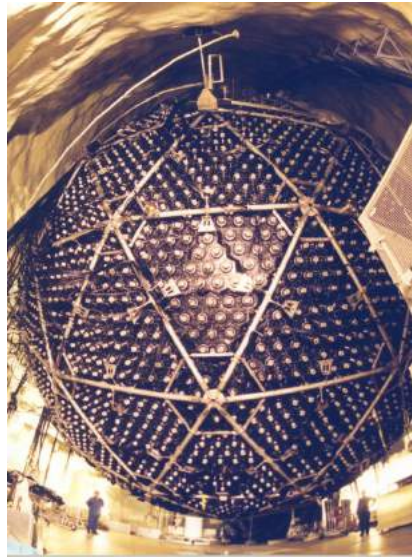
Quando o neutrino encontra um antineutrino, eles se aniquilam, gerando uma partícula virtual (não-observada) que é convertida em outro par de partículas. Por outro lado, dois neutrinos nunca ocupam o mesmo estado (por causa de seu $\text{spin-}\frac{1}{2}$).

Os neutrinos são muito difíceis de observar, pois não interagem eletricamente com nada. Eles só foram detectados em 1956, por Clyde Cowan, Frederick Reines e colaboradores. A figura abaixo é uma imagem raríssima de um neutrino, obtida em 1970 (figura fornecida pelo Argonne National Laboratory). O neutrino não deixa trajetória, mas ele colide com um próton (no centro do círculo amarelo), desaparece, e gera duas outras partículas, além do próton: um pión e um múon. A curvatura das trajetórias indica a carga das partículas (próton e pión positivos, e o múon negativo).



O neutrino é uma partícula da família dos “léptons”, que inclui também o elétron. O elétron já é bem pequenino, sendo quase 2000 vezes mais leve que o próton. O neutrino, por sua vez, é em torno de 1 milhão de vezes mais leve que o elétron. O par elétron-neutrino forma a primeira “geração” de léptons, mas há gerações mais pesadas: o múon (descoberto em 1937) e seu neutrino (1962), o tau (1975) e seu neutrino (2000).

O Sol é uma grande fonte de neutrinos, e para detectá-los é preciso construir imensas câmaras cheias de água, como o da figura abaixo, o Observatório Sudbury de Neutrinos, no Canadá (foto obtida da Wikipédia), de 12 metros de diâmetro, e cercado por 9600 detectores de luz. Como os neutrinos passam pela matéria ordinária quase sem interagir, como se ela fosse transparente, tais observatórios são construídos a um ou dois quilômetros abaixo da superfície, de forma a bloquear outras partículas, com exceção dos neutrinos.



Neutrinos são gerados por estrelas (como o Sol), por materiais radioativos, e também prevê-se a existência de neutrinos remanescentes do Big Bang (o início do Universo), que se movem a velocidades baixas (são frios) e não são detectáveis com a tecnologia atual. Nesse momento, haveria em torno de 20 milhões de neutrinos frios dentro do seu corpo!

Será que nossa alma é feita desses neutrinos frios? Será que eles formam um “campo quântico” que permeia nosso corpo e afeta nossa saúde? Não há nenhuma evidência científica disso, são apenas especulações fantasiosas, tão comuns nos livros de misticismo quântico.

*Deparei-me com as teses de Victor Mattos ao ler um artigo de Thaís Rafaela Hilger, Marco Antonio Moreira & Fernando Lang da Silveira, “Estudo de representações sociais sobre física quântica”, *Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia* 2 (2009), disponível na internet.

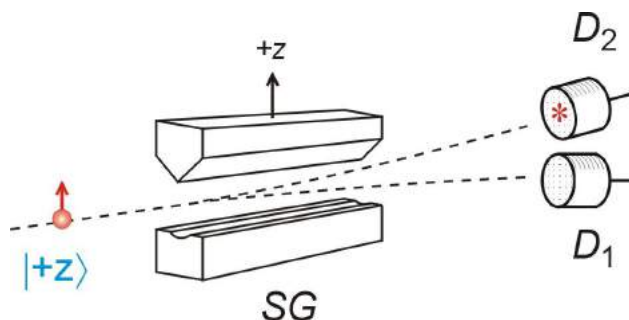
52. A Interpretação das Histórias Consistentes

Foi lançado no final de 2010 um livro intitulado *Teoria e Interpretações da Mecânica Quântica*, de Nelson Pinto Neto, físico do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. O livro é dirigido para alunos de física que já conheçam a mecânica quântica, apresentando de maneira rigorosa, e ao mesmo tempo didática, quatro das grandes interpretações da teoria quântica que têm sido bastante pesquisadas nas últimas décadas: a teoria de de Broglie-Bohm (que discutimos no texto 23), a interpretação dos vários mundos (que vimos no texto 22), o modelo dos colapsos espontâneos (texto 36) e a interpretação das histórias consistentes, que examinaremos neste texto. O livro apresenta as principais questões relacionadas aos fundamentos da teoria, cobrindo também outras interpretações. Termina com uma discussão sobre as aplicações da teoria quântica à cosmologia, que o autor analisa, de maneira original, segundo a teoria da onda piloto de de Broglie-Bohm. O livro é muito bom e contribuirá para

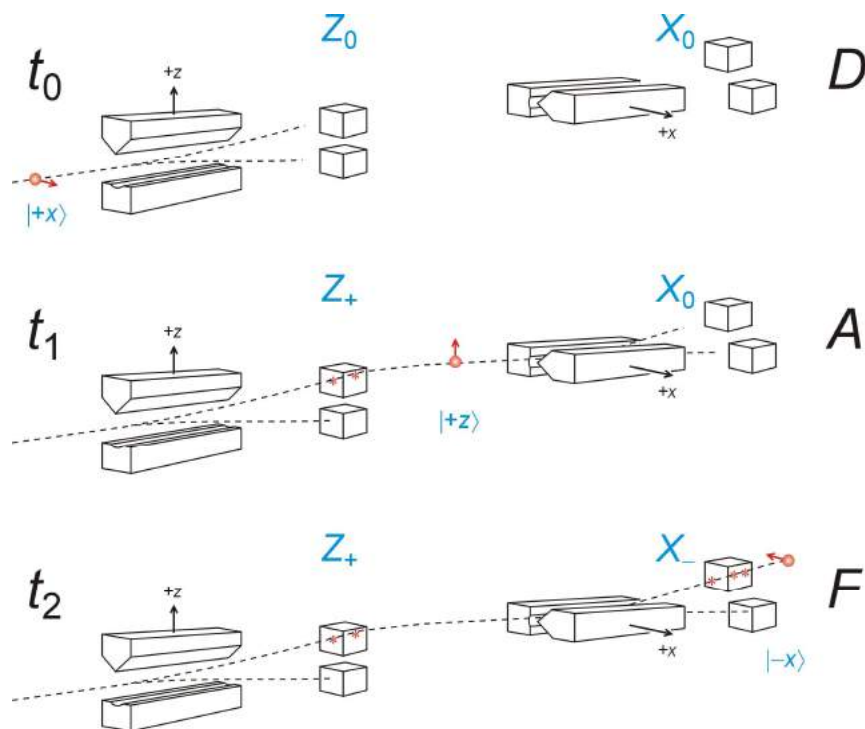
que os físicos brasileiros se convençam de que há várias interpretações diferentes e plausíveis que dão conta dos fenômenos quânticos. Quais delas são as melhores? Só o tempo dirá.

A interpretação das histórias consistentes foi proposta por Robert Griffiths em 1984, e posteriormente incorporada em uma ambiciosa teoria cosmológica por Omnès (1988) e Gell-Mann & Hartle (1990), que juntaram o conceito de história consistente com o de decoerência (que vimos no texto 21, “A fronteira entre o quântico e o clássico”). Aqui enfocaremos apenas a abordagem de Griffiths, que se aplica somente para as medições feitas em laboratório, e não para processos envolvendo o universo como um todo.

Diz-se que um sistema tem uma “propriedade” quando existe uma medição que forneça um resultado certo (com probabilidade 1). Por exemplo, um átomo pode ser preparado em um estado de spin- $\frac{1}{2}$ que aponta na direção e sentido $+z$: isso corresponde à propriedade de “spin na direção $+z$ ”, pois há uma medição, com o aparelho de Stern-Gerlach (que vimos no texto 6) orientado na direção $+z$, que fornece um resultado único (ver figura abaixo): detecção em D_2 .



Uma “história” é uma série de propriedades ou eventos ocorrendo numa sequência ordenada no tempo. Na figura abaixo representamos três conjuntos de eventos ocorrendo nos instantes t_0 , t_1 e t_2 .



No instante t_0 , o átomo está entrando no primeiro aparelho de Stern-Gerlach com a propriedade “spin na direção $+x$ ”. Os aparelhos que registram a passagem dos átomos estão em seus estados iniciais Z_0 e X_0 . O estado total pode ser representado por: $D = |+x\rangle Z_0 X_0$.

No instante t_1 , após a primeira medição, a partícula “colapsou” para o estado com a propriedade de “spin na direção $+z$ ”, e o primeiro aparelho registra este evento passando para o estado Z_+ . O estado total agora é representado por $A = |+z\rangle Z_+ X_0$.

Por fim, o átomo passa pelo segundo aparelho e ele acaba sendo registrado com “spin na direção $-x$ ”, colocando este aparelho no estado macroscópico X_- . O estado total ao final é $F = |-x\rangle Z_+ X_-$.

Temos assim uma história, representada pelos estados totais $D \rightarrow A \rightarrow F$, que é “consistente”, ou seja, ela é aceitável dentro da teoria quântica. Uma novidade da abordagem de Griffiths foi estipular a condição matemática que faz uma história ser consistente. Assim, em situações complicadas, basta fazer as contas para ver se uma dada história é consistente.

A história DAF é aceita nas interpretações usuais da mecânica quântica, em que a medição é considerada um processo irreversível. A concepção de Griffiths, porém, é formulada considerando que o sistema desenhado acima é fechado, o que significa que a evolução do sistema segue a equação de Schrödinger (ou seja, é “unitária”), sendo simétrica no tempo. Há duas consequências importantes desta hipótese de que o sistema é fechado.

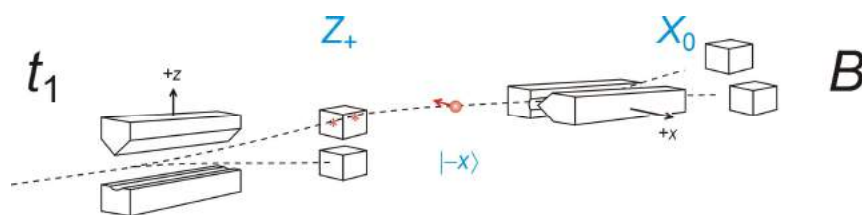
A primeira é que é aceitável descrever o aparelho de medição em uma superposição de estados. Nos eventos descritos acima pelo estado A, supõe-se que o estado do primeiro aparelho foi reduzido para Z_+ (pois alguém teria observado este resultado), mas se o sistema

for considerado fechado (antes da observação final, no tempo t_2), é aceitável considerar que o aparelho entre numa superposição quântica. O estado em t_1 seria então descrito por:

$$(1/\sqrt{2}) (| +z\rangle Z^+ X_0 + | -z\rangle Z^- X_0).$$

A segunda consequência, da hipótese de que o sistema pode ser considerado fechado, é que preserva-se a simetria temporal, e pode-se considerar a evolução do sistema do estado final F de volta para o estado inicial D . Neste caso, fica evidente que há uma outra história consistente para esse experimento. Dado que no instante t_2 mediu-se a propriedade “spin na direção $-x$ ”, é razoável supor que o átomo tivesse essa mesma propriedade no instante t_1 , e que a medição apenas revelou uma propriedade pré-existente. Esta hipótese é chamada “retrodição”, e ela já foi examinada no texto 30, “Retrodição é especulação?”.

Assim, pode-se definir um estado B , no instante t_1 , no qual a partícula está no estado $| -x \rangle$, conforme a figura abaixo.



A história $D \rightarrow B \rightarrow F$ também é consistente. Notamos então que a interpretação de Griffiths permite que se associem duas histórias diferentes para uma mesma situação experimental. Porém, essas duas histórias são incompatíveis, então precisamos escolher uma delas. A análise correta de uma situação quântica exige que escolhamos uma “família consistente de histórias”; se escolhermos simultaneamente as histórias DAF e DBF , teremos uma família inconsistente, e isso é inaceitável. Mas podemos escolher uma dessas possibilidades, desde que ela forme uma família consistente com as outras histórias que eventualmente estejam envolvidas em nossa análise.

Outro exemplo de história consistente é $DABF$, onde se supõe que a situação A precede temporalmente B . Já a história $DBAF$ é inconsistente, e deve ser rejeitada.

Bernard d’Espagnat (1989) criticou a interpretação das histórias consistentes, pelo fato de ela admitir que A é verdadeira, B é verdadeira, mas “ A e B ” não é verdadeira. Griffiths havia sugerido que sua interpretação resolveria os paradoxos envolvendo duas partículas correlacionadas (paradoxo de EPR e teorema de Bell) de maneira realista e local, e d’Espagnat tem razão em afirmar que a interpretação de Griffiths não é realista. Porém, a dificuldade lógica apontada por d’Espagnat e reconhecida por Griffiths não invalida a interpretação das histórias consistentes, mas apenas evidencia um aspecto contra-intuitivo da teoria quântica (expressa segundo a presente interpretação).

A interpretação de Griffiths é uma das mais belas interpretações da teoria quântica, devido à sua simplicidade e manutenção das simetrias quânticas, analisando diferentes situações de maneiras por vezes inesperadas. Ela pode ser classificada como uma versão moderna da classe de interpretações ortodoxas da mecânica quântica, caracterizadas pelo “fenomenalismo”. Segundo a interpretação de Griffiths, não se pode atribuir uma realidade ao sistema antes do final do experimento: uma vez finalizado o experimento, podem-se associar

diferentes quadros (famílias de histórias consistentes) ao experimento, de maneira mais ampla do que fez Niels Bohr com sua interpretação da complementaridade.

Em um texto vindouro, esclareceremos um pouco melhor esta última afirmação, analisando o interferômetro de Mach-Zehnder à luz da interpretação das histórias consistentes de Griffiths.

53. Dr. Manhattan e as Superposições Temporais

Francisco de Assis Nascimento Jr. faz pós-graduação na USP, e explora o uso de história em quadrinhos para ensinar física. Dentre suas histórias preferidas está *Watchmen*, escrito por Alan Moore, e desenhado por Dave Gibbons (1986). Trata-se da saga de ex-super-heróis que voltam a se reunir quando velhos, liderados pelo Dr. Manhattan, que tem poderes sobre-humanos e é capaz de controlar os átomos do seu próprio corpo. Assim, ele consegue mudar de tamanho, se teleportar, ocupar vários lugares ao mesmo tempo, e visitar diferentes tempos na ordem que ele quiser. O único limite para seu poder é sua ocasional indiferença para com o destino da humanidade.

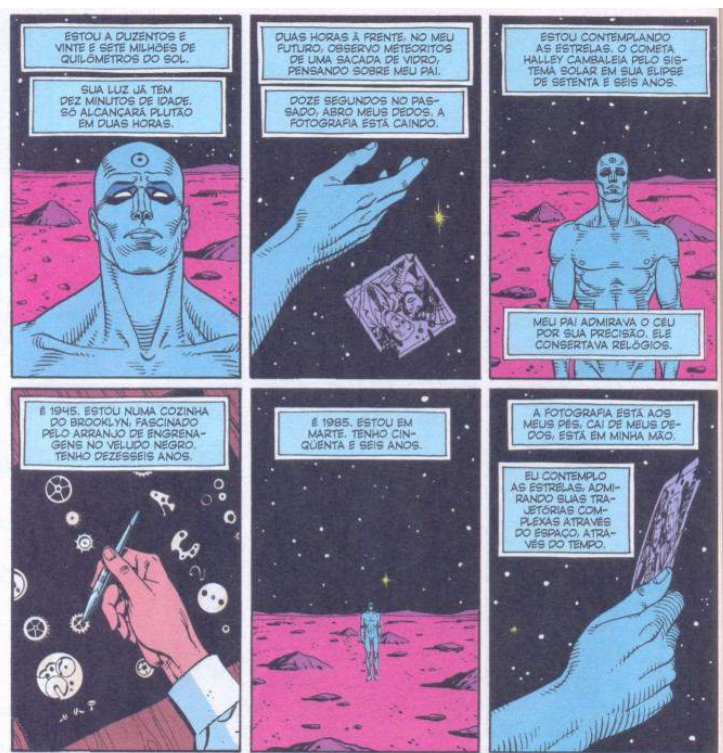
O entusiasmo de Francisco é com a qualidade da história e do desenho, um verdadeiro *graphic novel*, disponível em dois volumes pela Panini Comics. Contou-me também que Dr. Manhattan tem poderes quânticos, sendo neste sentido rivalizado por alguns outros personagens do mundo da HQ, como o Capitão Átomo (1960) e Jenny Quantum (2000). Após o filme *Watchmen* (2009), a revista *New Scientist* citou o Dr. Manhattan como sendo “o melhor super-herói quântico de qualquer universo”.

O que Dr. Manhattan tem de “quântico”, afora o poder de controlar as partículas elementares? Ele pode se duplicar, e estar em dois lugares ao mesmo tempo, como na cena abaixo, em que tenta agradar sua namorada Laurie:



Mas a duplicação do Dr. Manhattan não é um processo quântico, pois as duas versões têm existência concreta, podendo acariciar Laurie simultaneamente. Numa superposição quântica, as duas versões teriam que ser “potencialidades”, uma espécie de realidade intermediária, geralmente associada à onda quântica. E quando elas viessem a interagir com Laurie, um “colapso” da onda quântica teria que ocorrer, e uma das versões do Dr. Manhattan teria que desaparecer. Após esse colapso, apenas uma versão “atual” ou “concreta” acabaria abraçando a futura heroína Espectral.

Dr. Manhattan também pode visitar diferentes instantes temporais, quando se lembra de cenas passadas e vislumbra cenas futuras (ver figura abaixo).



Esta concepção do tempo em que cada instante é igualmente real, quer esteja no passado, presente ou futuro, é conhecida como “eternalismo”. A concepção antagonista, chamada “atualismo”, defende que apenas o presente é real. Na concepção representada nesta história, o futuro já estaria pré-determinado, o que é chamado de “determinismo”.

A teoria quântica é consistente com essas duas concepções sobre a natureza do tempo (eternalismo e atualismo). E apesar de os experimentos quânticos terem resultados imprevisíveis (para o caso de átomos individuais), a teoria é consistente tanto com o indeterminismo (ou “tiquismo”) quanto com o determinismo (ver texto 23).

No entanto, a teoria quântica traz uma grande novidade com relação ao tempo, que é a possibilidade de haver “superposições temporais”. Será que o poder que o Dr. Manhattan tem de “visitar” diferentes épocas equivale a uma superposição temporal?

Em primeiro lugar, devemos considerar um “evento”, que é um acontecimento bem definido que ocorre em algum ponto do espaço e do tempo. Por exemplo, quando o Dr. Manhattan deixa cair a foto em Marte, a foto em que ele, Jon Osterman, conhece sua primeira esposa, Janey Slater, antes do terrível acidente em que ficou preso numa “câmara de remoção de campo intrínseco”. Uma superposição temporal seria o evento “Manhattan deixa cair a foto” estar associado a diferentes instantes de tempo, por exemplo às 9:00, às 9:15 e às 9:30 horas. Ou seja, o evento não ocorre em um instante bem definido, mas está associado a vários instantes ou a todo um intervalo contínuo de tempo.

De maneira análoga à superposição espacial (que vimos acima), os eventos associados às 9:00, às 9:15 e às 9:30 horas são potencialidades, não atualidades concretas. É só quando Dr. Manhattan ou sua foto acabar interagindo com alguma coisa concreta que ocorrerá o colapso de sua onda quântica, e então o evento passa a estar associado a um instante bem definido, digamos 9:15.

Vemos assim que as duplicações espaciais e as viagens no tempo do Dr. Manhattan não são propriedades genuinamente “quânticas”. Não há, na história de Alan Moore, transições de potencialidades para atualidades. Isso sugere que deveríamos criar um super-herói genuinamente quântico: ele talvez não fosse muito poderoso, mas certamente poderia contribuir para o ensino de física quântica nos colégios!

Superposições temporais ocorrem em processos de emissão de partículas, antes que elas sejam medidas. Por exemplo, um núcleo atômico radioativo tem uma certa probabilidade de emitir uma partícula alfa (dois prótons e dois nêutrons grudados), dentro de um certo intervalo de tempo. É assim que aprendemos no colégio, e não parece haver nada de misterioso. Há um evento, “a emissão da partícula alfa”, e ele ocorre em algum instante bem definido, só que não podemos prever qual será este instante, então atribuímos uma certa probabilidade para o fenômeno.

O pensamento quântico é diferente, especialmente se adotarmos uma interpretação ondulatória realista (ver texto 35). No nível das potencialidades, o evento ocorre em vários instantes sucessivos, em uma grande superposição temporal. Quando a onda quântica começa a interagir com o detector, começa a ocorrer sucessivos colapsos da onda quântica. Enquanto a partícula não é detectada, temos um experimento de resultado nulo (como vimos no texto 48). Num certo instante, ocorre a detecção, e só então é que se pode dizer que o evento de emissão ocorreu em um instante (do passado) bem determinado. Podemos então dizer que “o passado se atualiza no presente”, concordando de maneira geral com as afirmações feitas por John Wheeler ao analisar o experimento da escolha demorada (texto 13).

Mas porque somos obrigados a tratar o núcleo radioativo como uma superposição temporal quântica, e não como um processo de emissão simples (como aprendemos no colégio)? Porque existem experimentos de interferência que só podem ser explicados supondo que há uma superposição temporal.

O mais claro desses experimentos talvez seja o de James D. Franson (1989), envolvendo duas partículas correlacionadas. Como ele é um tanto complicado, deixaremos seu estudo para um texto futuro.

54. Três Tipos de Complementaridade

Vimos no texto 10, “O Yin-Yang da Complementaridade”, que Niels Bohr propôs em 1928 um princípio geral para a física quântica, que chamou de *princípio da complementaridade*. Examinamos a aplicação mais conhecida deste princípio, a “complementaridade de arranjos experimentais”, também conhecida como “dualidade onda-partícula”. Dado um certo experimento, que tenha chegado ao seu final com a detecção de um quantum de energia, pode-se associar a ele um certo quadro mental, consistente com a física clássica. Este quadro pode ser de dois tipos: se o experimento envolver algum efeito de interferência, o quadro deverá ser “ondulatório”; se uma trajetória única puder ser inferida para o passado (“retrodição”, ver texto 30), o quadro será corpuscular. O princípio de complementaridade afirma que qualquer fenômeno pode ser concebido ou num quadro ondulatório, ou num quadro corpuscular, mas nunca em ambos simultaneamente. Ou seja, se temos interferência, não temos trajetória, e vice-versa. As descrições ondulatória e corpuscular seriam “mutuamente excludentes”. Além disso, Bohr afirmava que esses dois quadros “exaurem” ou esgotam as possibilidades de descrição, ou seja, não haveria uma maneira mais completa de representar uma entidade quântica.

A noção de que onda e partícula são mutuamente excludentes nos lembra do enunciado do princípio de incerteza (texto 12), que afirma que é impossível medir simultaneamente, com exatidão, a posição e a velocidade (ou momento linear) de uma partícula. Há assim uma analogia entre o par onda-partícula e o par posição-momento. Ambos envolvem um par que não pode ser observado simultaneamente de maneira precisa.

Há porém uma diferença marcante entre esses dois pares. Onda e partícula são *mutuamente excludentes* na física clássica, sendo que um é a negação lógica do outro: uma onda é espalhada mas uma partícula é bem localizada; uma onda pode ser dividida indefinidamente, ao passo que uma partícula é indivisível (abaixo de uma certa energia). Por outro lado, posição e momento linear são sempre *conjuntamente bem definidas* na mecânica clássica de partículas.

Essa diferença indica que há diferentes tipos de complementaridade, que podem ser divididos em três grupos, conforme apontou Carl von Weizsäcker, em 1955.

(1º tipo) *Complementaridade entre coordenação espaço-temporal e asserção da causalidade*. Este foi o primeiro tipo de complementaridade citado por Bohr, mas, curiosamente, ele seria abandonado.

Em seu artigo de 1928, Bohr notou que só se pode *definir* o estado de um sistema físico quando todos os distúrbios externos são eliminados. No entanto, um sistema mantido sob tais condições de isolamento não pode ser observado! Por outro lado, se ocorrer uma *observação*, com o distúrbio acompanhante, “então uma definição sem ambigüidades do estado do sistema naturalmente não é mais possível”. Temos assim uma complementaridade entre observação e definição.

Um sistema isolado conserva energia e momento linear (quantidade de movimento), e portanto pode-se dizer que satisfaz a *causalidade*. Como, porém, ele não pode ser observado, não é possível associar uma posição espacial e um instante temporal a ele. Por outro lado, ao ser observado, um sistema passa a ter uma *coordenação espaço-temporal* (dada pelo resultado da medição), mas seu estado (após a redução) não evoluiu a partir do estado anterior de acordo com a lei da causalidade (ou seja, de maneira determinista).

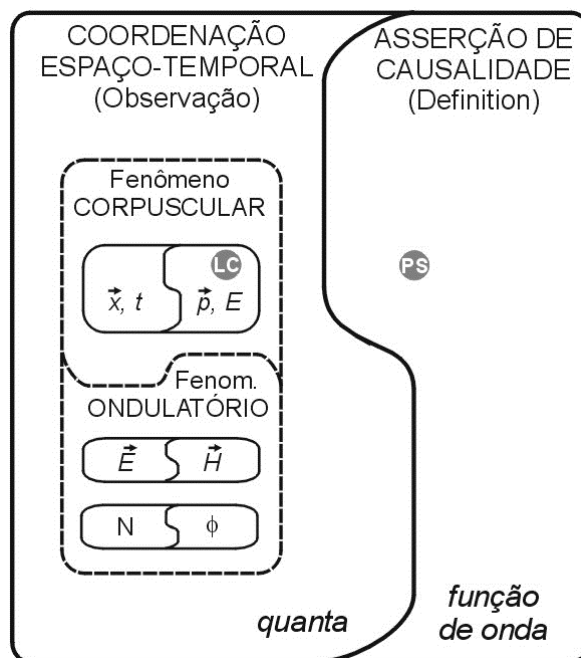
Segundo Bohr, “a própria natureza da teoria quântica nos força assim a considerar a coordenação espaço-temporal e a asserção da causalidade, cuja união caracteriza as teorias clássicas, como aspectos complementares mas excludentes da descrição, simbolizando a idealização da observação e da definição, respectivamente”. Este foi o primeiro enunciado do princípio de complementaridade. Esse par envolve características que são consistentes na Física Clássica: nesta, temos coordenação espaço-temporal e causalidade. Na figura abaixo, este tipo de complementaridade é representado pela divisão externa da figura (em forma de um diagrama yin-yang retangular).

Após 1928, no entanto, Bohr passou a se incomodar com o fato de que este tipo de complementaridade feria princípios “fenomenalistas”, ou seja, fazia referência a uma realidade não observada (que estaria por trás dos fenômenos observados). Fazia-se uma distinção entre um átomo enquanto existente e o mesmo átomo enquanto conhecido, o que não fazia sentido para uma posição antirealista ou fenomenalista (que incluiria o positivismo e o construtivismo kantiano), que identificava o existente e o conhecido. Como distinguir entre observação e definição, se o fenomenalismo estipula que só o que é observado é definível? Apenas de um ponto de vista “realista” é possível dar sentido a este 1º tipo de complementaridade.

(2º tipo) *Complementaridade entre partícula e onda*. Após a pequena crise conceitual pela qual Bohr passou em 1929, na qual reteve apenas o domínio da “observação” (rejeitando a pura “definição”), ele passou, especialmente a partir de 1935, a priorizar a complementaridade entre onda e partícula. Já vimos que esse tipo de complementaridade estipula que os aspectos de onda e partícula são mutuamente excludentes, o que é também válido na física clássica. Na figura abaixo, indicamos esse tipo pela símbolo de yin-yang desenhado com linha tracejada.

(3º tipo) *Complementaridade entre observáveis incompatíveis, como posição e momento*. Este tipo, que foi salientado especialmente por Wolfgang Pauli, é sinônimo do princípio de incerteza. Aqui temos dois aspectos que são *consistentes* na física clássica de partículas: posição e momento linear (x e p , na figura), ou tempo e energia (t e E). Isto distingue este tipo de complementaridade do 2º tipo, entre partícula e onda. Podemos igualar este 3º tipo ao 1º tipo? Alguns comentaristas fazem isso, o que significa identificar a asserção da causalidade com as leis de conservação. Mas o 1º tipo envolve uma oposição entre o observado e o não-observado, o que está naturalmente ausente no 3º tipo.

É interessante notar que os pares posição-momento e energia-tempo se restringem a *partículas*. Por simetria, somos levados a nos perguntar sobre pares complementares que ocorram só na representação ondulatória. Heisenberg pensou nesta possibilidade, e sugeriu um princípio de incerteza entre campos elétrico e magnético (E e H). Na teoria quântica de campo, podemos pensar na relação de incerteza envolvendo número de quanta (N) e fase (ϕ), o que pode ser interpretado como uma complementaridade entre amplitude da onda (cujo quadrado fornece a intensidade ou número de quanta) e a fase da onda, aspectos que são consistentes na física clássica de ondas, mas que são mutuamente excludentes na mecânica quântica (vimos isso na última figura do texto 43, “Os estados coerentes de Glauber”).

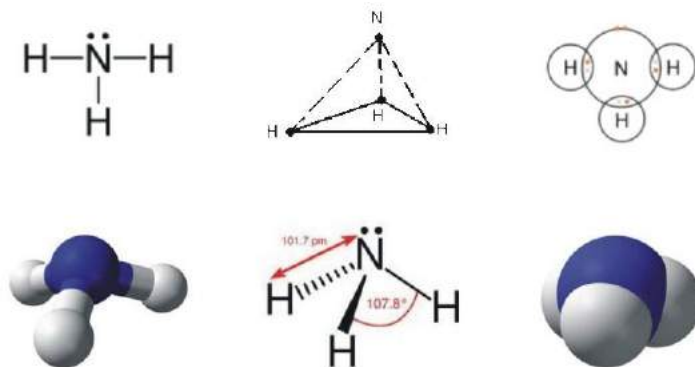


Em seu artigo de 1928, Bohr também se referiu à complementaridade entre o princípio de superposição (onda se propagando no espaço e tempo) e leis de conservação (um fóton conserva momento e energia), o que parece envolver uma mistura de diferentes tipos de complementaridade. Ao falar sobre o princípio de superposição (PS na figura), Bohr parece estar pensando na “asserção de causalidade” do 1º tipo de complementaridade (e não no fenômeno ondulatório do 2º tipo); ao falar das leis de conservação (LC na figura), ele parece estar se referindo aos observáveis de momento (ou energia) dentro do 3º tipo de complementaridade (que fazem parte do quadro corpuscular da complementaridade entre partícula e onda).

Como ilustração adicional dos 2º e 3º tipos de complementaridade, consideremos o efeito Compton, que em 1923 foi explicado em termos das leis de conservação da mecânica clássica de partículas. Trata-se de um fenômeno *corpuscular*, de acordo com 2º tipo de complementaridade, já que depois da medição do par espalhado de partículas (elétron e raio gama) pode-se inferir (por retrodição) a trajetória seguida por cada partícula. Mas isso não significa que a posição exata da colisão poderia ser conhecida antes da detecção. Tal possibilidade introduziria uma incerteza nos momentos que invalidaria as leis de conservação. Assim, com relação ao 3º tipo de complementaridade, o efeito Compton foi classificado por Bohr (em artigo de 1949) como envolvendo momentos bem definidos, mas não posições bem definidas, apesar de o fenômeno ser corpuscular.

55. A Pirâmide Dupla da Molécula de Amônia

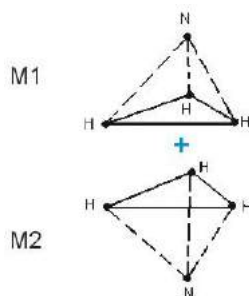
A amônia é um gás com aquele odor pungente, emitido por certos produtos de limpeza ou pela urina estagnada. Sua molécula é bastante simples, consistindo de um átomo de nitrogênio e três de hidrogênio, em estrutura de pirâmide (tetraedro). Ela é representada pela fórmula química NH_3 , e é desenhada das seguintes maneiras nos livros:



Os elétrons desta molécula se agrupam perto do nitrogênio, de forma que a molécula é considerada polar, tendo um “dipolo elétrico” que de fato é medido em campos elétricos externos.

No entanto, uma molécula isolada de nitrogênio tem dipolo elétrico nulo! Ou seja, ela tende a manter uma simetria esférica na ausência de forças externas. Isso só pode ser explicado pela física quântica, através da noção de superposição de estados.

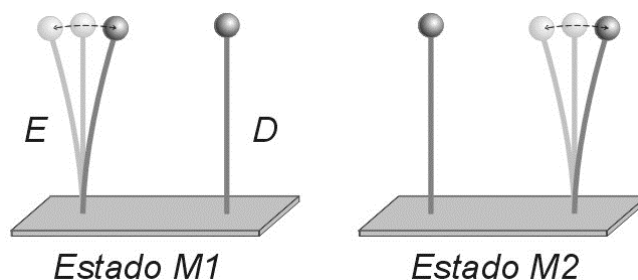
Considere uma única molécula de amônia (para definir claramente as direções, vamos supor que a molécula gira com uma velocidade angular definida em torno do eixo que passa pelo átomo de nitrogênio e pelo centro dos átomos de hidrogênio). O que ocorre é que, na ausência de uma medição, a molécula deve ser representada da seguinte maneira:



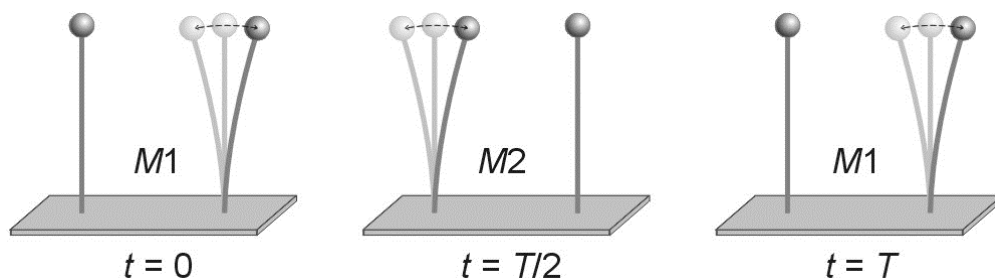
É como se ela estivesse, ao mesmo tempo, com o átomo de nitrogênio para cima (modo M1) e para baixo (M2) do plano dos átomos de hidrogênio (pelo menos como uma potencialidade, descrita pela função de onda, antes de uma medição). Ao invés de uma estrutura piramidal, ela seria uma pirâmide dupla!

Há porém sutilezas com relação a essa situação, então o melhor a fazer é examinar uma analogia com um exemplo da física clássica, que é o sistema de dois osciladores linearmente acoplados.

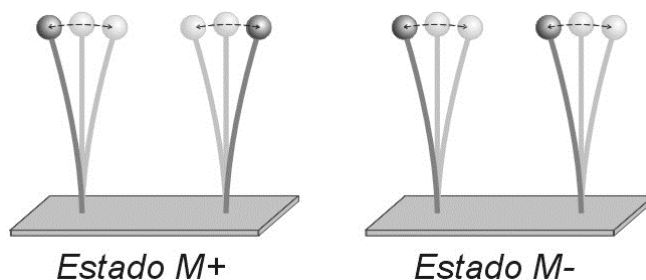
Considere duas varetas verticais rígidas idênticas, cada uma com uma bola em sua ponta superior, e ambas presas por baixo em um mesmo suporte. Podemos definir dois estados análogos aos estados da amônia: M1 corresponde à vibração da vareta da esquerda, enquanto a da direita permanece fixa; M2 corresponde à situação inversa.



Acontece, porém, que a energia da vibração de uma vareta é transmitida para a outra por meio do suporte. Ou seja, se o sistema começa no estado M1, aos poucos o movimento é transmitido para a outra vareta e, após um certo tempo $T/2$, o sistema passa ao estado M2. Após um tempo igual, a situação volta para o estado inicial M1 e assim por diante. O sistema oscila com um período T , chamado “período de batimento”.

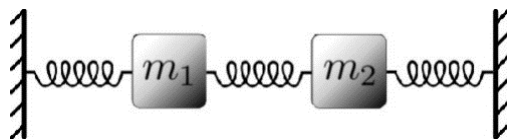


O curioso é que podemos construir dois outros modos em que a energia do sistema não oscila de um lado para outro. O primeiro é o modo $M^+ = \frac{1}{2} M1 + \frac{1}{2} M2$, e o segundo é $M^- = \frac{1}{2} M1 - \frac{1}{2} M2$:



A diferença é que no primeiro caso as varetas oscilam em sentidos opostos (fora de fase), e no segundo caso oscilam no mesmo sentido (em fase). Esses dois modos são chamados “modos normais”, ou então “estados estacionários”, pois o estado de vibração das duas varetas não muda com o tempo. Qualquer estado do sistema pode ser descrito como uma superposição dos modos M^+ e M^- (com diferentes pesos para cada modo), ou então como uma superposição dos modos M1 e M2.

O tratamento teórico desse sistema de osciladores acoplados utiliza como modelo duas massas presas por molas de constante k :



No modo M^+ , quando as duas massas oscilam em sentidos opostos, há uma maior energia de esticamento da mola central, o que leva a uma maior frequência de oscilação (menor período). No modo M^- , a mola central não estica, mas oscila junto com as massas: neste caso a energia armazenada no sistema é 3 vezes menor, e a frequência também é menor (raiz de 3 vezes menor).

Voltemos agora para o caso quântico da molécula de amônia. Se a molécula for inicialmente colocada no estado $M1$, com o nitrogênio acima dos átomos de hidrogênio, o que vai ocorrer é que ela vai ter uma oscilação de batimento e o nitrogênio vai aos poucos sendo localizado abaixo do plano dos átomos de hidrogênio. Depois ele volta, e fica oscilando na frequência de batimento entre os dois estados $M1$ e $M2$.

Porém, se a molécula for inicialmente preparada no estado de superposição $M^+ = \frac{1}{2} M1 + \frac{1}{2} M2$, ele permanecerá neste estado estacionário, sem apresentar oscilações de batimento! O mesmo vale para o estado M^- , que no entanto tem energia menor do que M^+ , de forma análoga ao caso clássico.

É por isso então que se diz que uma molécula de amônia flutuando no vácuo, com energia bem definida, não tem momento de dipolo elétrico, ou seja, tem a simetria de uma pirâmide dupla (como M^-)! Porém, quando um campo elétrico externo é aplicado e se mede o dipolo elétrico, acaba ocorrendo um colapso da pirâmide dupla para uma das orientações da pirâmide ($M1$ ou $M2$). Esse é um exemplo de como uma medição interfere no sistema quântico.

Para uma interpretação ondulatória realista (ver texto 35), a molécula tinha uma estrutura de pirâmide dupla antes da medição, e a medição produz valores que não eram bem definidos antes da medição (mas apenas depois). Por outro lado, para a interpretação da complementaridade, após a medição dos dipolos elétricos, pode-se aplicar a “retrodição” (ver texto 30) e dizer que as moléculas sempre tiveram apenas a estrutura piramidal. Segundo esta visão, a estrutura de pirâmide dupla só poderia ser associada ao sistema quando o fenômeno medido fosse de tipo “ondulatório”.

Quando o estado inicial do sistema é $M1$, e ele passa ao estado $M2$, é costume na literatura falar-se em “tunelamento” do nitrogênio entre as duas posições. Porém, como não há uma medição sendo feita, prefiro não utilizar o termo. Senão, o que se diria do estado M^- : que ocorre tunelamento nos dois sentidos simultaneamente?

A discussão precedente é feita pelo físico Richard Feynman, em seu famoso livro *Lições de Física de Feynman*, traduzido pela Editora Artmed em 2008, vol. 3, cap. 8. Ele não fala explicitamente em “tunelamento”, mas sim em “penetração de barreira de energia” (p. 8-13). Outro livro que discute este problema é o excelente manual de experimentos quânticos, publicado em 1997 por Greenstein & Zajonc, intitulado *The Quantum Challenge*, p. 177-9, e que fala em tunelamento. Outro texto que discute esta questão e fala em tunelamento é o famoso artigo de Philip Anderson, “More is different”, *Science* 177 (1972) p. 393-6. Neste artigo, ele discute a questão de que moléculas maiores do que a de amônia só são encontradas

nos estados M1 ou M2, mas nunca em uma superposição. Isso é atualmente explicado por meio da decoerência induzida pelo ambiente, que exploramos no texto 21, “A fronteira entre o quântico e o clássico”.

A analogia apresentada entre um sistema de física clássica ondulatória e um sistema quântico é vista aqui como parte da “explicação” da situação quântica (no espírito do que foi feito no texto 32). No entanto, Feynman considera que esta analogia não revela uma estrutura subjacente em comum entre as duas situações: “a analogia com o pêndulo não é muito mais profunda do que o princípio de que as mesmas equações possuem as mesmas soluções” (p. 8-15).

Mesmo assim, levando adiante a analogia entre os sistemas quânticos e as notas musicais produzidas em sistemas clássicos, Feynman conclui que o estado M1, no qual o nitrogênio está acima do plano dos átomos de hidrogênio, e que é uma superposição de estados que possuem frequências puras (M^+ e M^-), seria equivalente a um som musical consistindo de duas notas diferentes mas próximas, que geram batimentos sonoros.

Explorando essa analogia, podemos descrever como ouviríamos uma música quântica! Acabaria sendo uma versão sonora do pontilhismo da pintura de Georges Seurat.

56. Fenômenos Intermediários entre Onda e Partícula

Já exploramos o *princípio de complementaridade* nos textos 10 (“O Yin-Yang da Complementaridade”) e 54 (“Três Tipos de Complementaridade”). O princípio afirma que, dado um experimento, podemos entendê-lo ou usando um quadro corpuscular (de partícula), ou um quadro ondulatório. Um “fenômeno” corpuscular é aquele ao qual se pode associar ao objeto quântico uma trajetória sem ambiguidade. Um fenômeno ondulatório, para nossos propósitos, será caracterizado por exibir franjas de interferência (que podem ser espaciais ou temporais). Esses quadros provêm da física clássica, então até aqui não falamos nada de diferente do que acontece na física clássica.

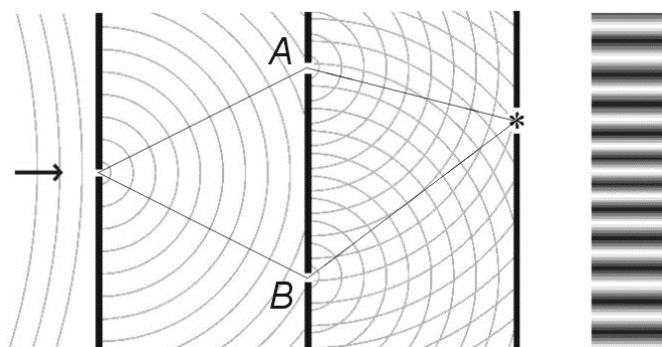
A diferença está em que esses dois tipos de fenômenos (corpuscular ou ondulatório) podem ocorrer para a mesma entidade, por exemplo um elétron (onda eletrônica) ou um fóton (onda luminosa). Como ocorre na física clássica, um experimento não pode corresponder, ao mesmo tempo, a um quadro ondulatório e a um quadro corpuscular: ou é um, ou é outro. Em outras palavras, esses fenômenos são mutuamente excludentes. Mas na física clássica, a característica de ser onda ou partícula é atribuída somente ao objeto; na física quântica, ela seria atributo da *relação* entre objeto e aparelho de medição. Conforme montamos um experimento para detectar um elétron ou fóton, que sempre serão observados de maneira pontual (auto-estado de posição), o quadro a ser associado (onda ou partícula) dependerá de como o experimento é montado. Já vimos também que a escolha experimental do tipo de fenômeno pode ser adiada para depois que o objeto quântico interagiu com partes do aparelho de medição (texto 13, “A Escolha Demorada”).

Niels Bohr também afirmava que esses dois tipos de fenômenos “exaurem” as possibilidades de descrição de uma entidade quântica, como um elétron, ou seja, não haveria uma maneira mais completa de representar o elétron. Às vezes, isso é tomado como a constatação de que a entidade quântica é complexa demais para ser representada pela mente humana, de forma que

só conseguimos descrevê-la de duas perspectivas diferentes e incompletas, “onda” ou “partícula”.

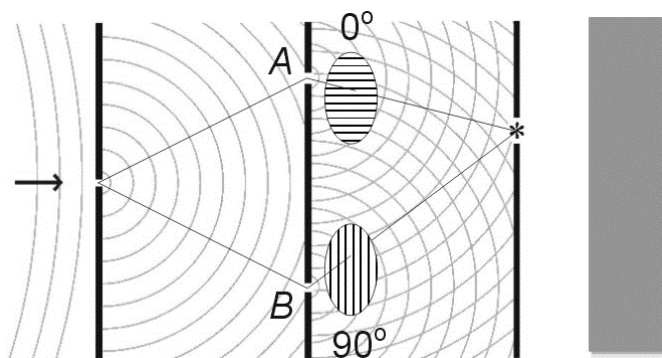
Em 1979, William Wootters & Wojciech Zurek mostraram que é possível haver um fenômeno *intermediário* entre um 100% onda ou 100% partícula. A montagem proposta por eles envolvia o experimento da dupla fenda, com um detector um tanto complicado. No ano seguinte, Lawrence Bartell apresentou duas versões mais simples.

Simplificaremos seu segundo exemplo, considerando um experimento de dupla fenda com polarizadores, conforme as figuras abaixo. Primeiro, vamos considerar o experimento sem polarizadores, que é claramente um fenômeno ondulatório, já que se veem franjas de interferência na tela detectora, à direita:



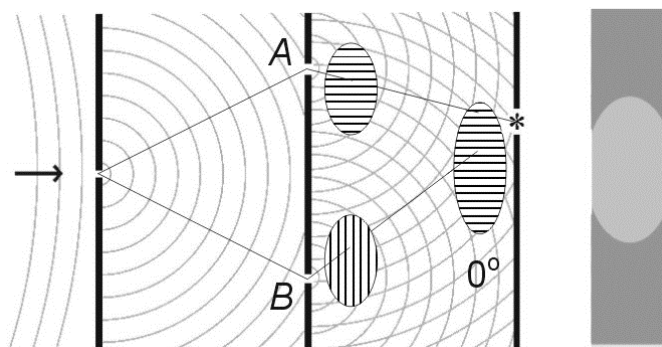
Relembrando o que está representado na figura, temos luz vindo da esquerda, passando por uma fenda simples, e depois por duas fendas. A luz é representada como ondas esféricas, mas a detecção pontual de um fóton, à direita, também é indicada. Duas trajetórias são consistentes com esta situação, numa razão $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{2}$. Assim, não havendo uma única trajetória bem definida, o fenômeno não é corpuscular. Por outro lado, após um grande número de fótons serem detectados, percebe-se o padrão de interferência, indicado à direita. Assim, o fenômeno é claramente ondulatório.

Suponha agora que dois polarizadores sejam colocados após cada fenda, estando eles orientados em direções perpendiculares (estudamos polarizadores no texto 49). O resultado disso é que as franjas de interferência desaparecem, pois feixes de luz que oscilam em direções perpendiculares não podem se cancelar, de forma a criar regiões escuras (e nem se reforçar, de forma a criar regiões mais claras).

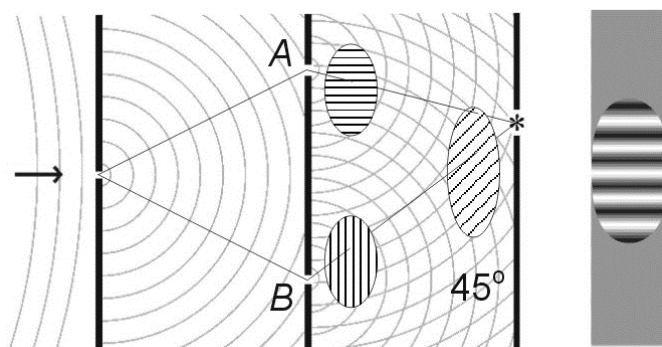


Este fenômeno não é ondulatório, pois não há franjas de interferência. Será que ele pode ser considerado um fenômeno corpuscular? Apesar de, neste experimento, não termos como saber por qual fenda passou o fóton, pode-se em princípio determinar o estado de polarização do fóton detectado, de maneira que há informação disponível sobre a trajetória do fóton. Assim, o fenômeno é claramente corpuscular.

Por exemplo, se colocarmos um polarizador adicional orientado a 0° defronte da tela detectora, todos os fótons que passarem por ele e forem detectados terão claramente passado pela fenda A (pois a luz polarizada a 90° não passa pelo polarizador orientado a 0°):



Por outro lado, se o polarizador adicional estiver orientado a 45° , ele agirá como um “apagador quântico”, apagando a informação de trajetória. Neste caso, as franjas de interferência reaparecem!



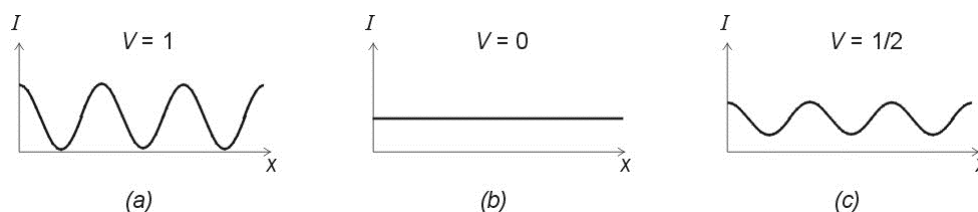
Em relação às franjas da primeira figura, a intensidade destas franjas decai para $\frac{1}{4}$, devido à atenuação introduzida pelos polarizadores. Mas os fótons detectados atrás do último polarizador correspondem a um fenômeno claramente ondulatório.

Para introduzir um fenômeno intermediário, basta girar o último polarizador para uma direção intermediária entre 0° e 45° , por exemplo $22,5^\circ$. Neste caso, o fenômeno será $\frac{1}{2}$ ondulatório e $\frac{1}{2}$ corpuscular!

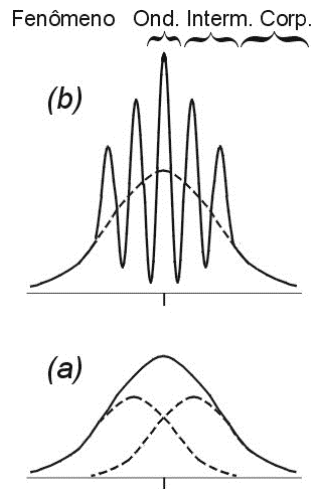
O que significa isso? Considere um fóton que é detectado atrás do último polarizador. Se quisermos atribuir uma trajetória a ele, devemos reconhecer que ele poderia passar por qualquer uma das duas fendas, mas a probabilidade de ele ter passado pela fenda A é maior, já que $22,5^\circ$ é mais próximo de 0° do que de 90° . A razão será $\frac{3}{4}$ a $\frac{1}{4}$. Para determinar a porcentagem que o fenômeno é corpuscular, basta subtrair os termos da razão: $\frac{3}{4}$ menos $\frac{1}{4}$ é $\frac{1}{2}$, então este fenômeno é 50% corpuscular (pela fenda A), e 50% ondulatório.

Fenômenos intermediários nunca foram pensados por Bohr, apesar de eles serem bastante simples de produzir. A concepção de dualidade onda-partícula do físico dinamarquês fica menos nítida com este novo resultado, mas pelo menos a noção de complementaridade pode ser salva, pois o fenômeno obtido com o polarizador a $22,5^\circ$ é complementar ao fenômeno obtido com o polarizador a $67,5^\circ$. Este último também é 50% corpuscular, e 50% ondulatório, mas é corpuscular pela fenda B.

Em termos observacionais, pode-se caracterizar o fenômeno intermediário por uma “visibilidade” entre 0 e 1. Na figura abaixo, vemos em (a) um padrão de interferência típico de um fenômeno ondulatório, com pontos completamente escuros, correspondendo à visibilidade 1. Em (b), a visibilidade é zero, e não há nenhuma franja de interferência, que é a situação que ocorre em um fenômeno corpuscular. A situação em (c) corresponde ao fenômeno que é 50% corpuscular e 50% ondulatório, com visibilidade $\frac{1}{2}$, sendo a média das duas primeiras situações.



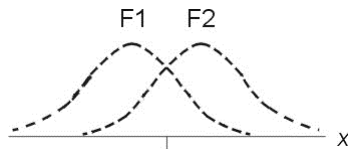
Essa análise indica que mesmo no experimento usual da dupla fenda, com fendas bem separadas, como na figura abaixo, em regiões bem fora do eixo central, em que a amplitude vinda de uma fenda é significativamente maior do que a amplitude vinda da outra, tem-se um fenômeno intermediário, caracterizado por uma visibilidade entre 0 e 1. Nessas regiões fora do eixo central, pode-se atribuir uma probabilidade maior de o fóton ter passado pela fenda mais próxima.



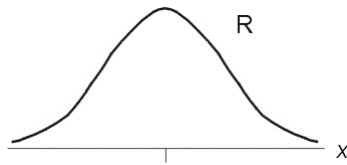
Nesta última figura, em (a), representa-se pelas linhas tracejadas o padrão de intensidade formado pela passagem da onda quântica por cada uma das fendas em separado (ou seja, a situação em que uma das fendas está sempre fechada). A soma dessas curvas fornece a linha cheia. Em (b), a linha cheia apresenta o padrão de interferência com as duas fendas abertas simultaneamente. Indicam-se acima regiões de ocorrência dos fenômenos ondulatório, intermediário e corpuscular.

57. Superposição de Amplitudes na Quântica e na Genética

Um dos conceitos centrais em qualquer ramo da física que trata de ondas é o conceito de superposição de amplitudes (às vezes chamado de “sobreposição”). Suponha que tenhamos dois feixes de onda F1 e F2 que provieram da mesma fonte coerente, e que tenham mantido essa coerência (ou seja, os “sobes e desces” dos dois feixes continuam ocorrendo em sincronia, sem terem sido borrados pela ação do meio). Isso ocorre tipicamente em um experimento de fenda dupla. As intensidades de cada onda, F1 e F2, detectadas separadamente em uma tela fosforescente, estão indicadas na figura abaixo:

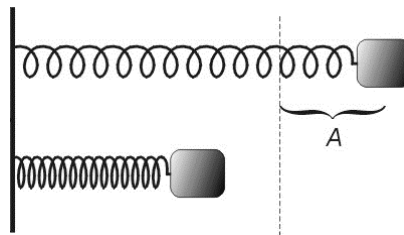


Olhando para padrão de intensidade obtido por cada feixe, qual seria o padrão resultante quando os dois feixes caem ao mesmo tempo na tela de detecção? Poderíamos supor que seria a mera soma R das intensidades F1 e F2:



No entanto, esta suposição está errada! Para prever o padrão de intensidade resultante é preciso trabalhar com as *amplitudes* das ondas, não as intensidades! A amplitude A é a raiz quadrada da intensidade I em cada ponto x : $I(x) = A(x)^2$. O que se somam não são as intensidades, mas as amplitudes!

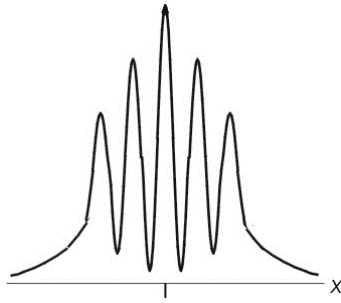
Esta relação entre a intensidade (energia) e a amplitude ocorre também no caso de uma mola oscilante. Se eu estico um peso, preso por uma mola, até uma amplitude A , e o solto, ele oscilará com energia igual a $\frac{1}{2}kA^2$, que é o análogo da intensidade. Porém, neste caso, duas molas oscilando com mesma energia podem estar, no mesmo instante, em posições diferentes, como na figura abaixo. Elas estariam em fases diferentes do movimento, ou seja, teriam “fases” diferentes.



Voltando ao exemplo da soma de ondas, a descrição das amplitudes de cada onda contém também informação sobre a fase de cada onda. Essa informação desaparece quando se eleva a amplitude ao quadrado. Isso é expresso matematicamente considerando que a intensidade é o “módulo quadrado” da amplitude: $I(x) = |A(x)|^2$. As barrinhas verticais indicam que a fase da amplitude é ignorada ao escrever a intensidade.

Quando duas ondas se superpõem, a informação sobre suas fases relativas é importante para calcular o resultado final. Se uma estiver um pouco mais adiantada do que a outra, em seu “sobe e desce”, o resultado será diferente do que no caso em que ela não está adiantada.

Assim, para calcular a intensidade resultante, é preciso primeiro somar as amplitudes levando em conta as fases relativas, e só depois calcular o módulo quadrado: $R(x) = |f_1(x) + f_2(x)|^2$, onde $f_1(x)$ é a raiz quadrada da intensidade F_1 multiplicada por um “fator de fase”, geralmente expresso por um número complexo. Ao se somarem as duas amplitudes complexas, das ondas parciais, obtém-se a amplitude final, cujo módulo quadrado é a intensidade (energia). No caso do experimento da fenda dupla, a intensidade medida na tela é algo assim:

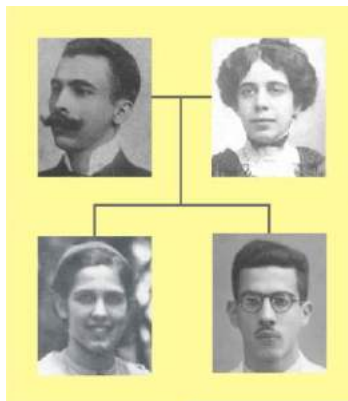


Esses resultados da Física Ondulatória Clássica foram incorporados na Mecânica Quântica em 1925, a partir do trabalho de Heisenberg, e um pouco depois na abordagem de Schrödinger. No entanto, é curioso que a importância das amplitudes já tinha se tornado claro três anos antes, em outra área da ciência: a Genética.

Em 1922, o grande matemático e biólogo Ronald A. Fisher buscava distinguir populações em termos de seus traços genéticos, e percebeu que a abordagem matemática correta seria utilizar não as probabilidades dos diferentes alelos genéticos, mas a raiz quadrada destas probabilidades, ou seja, as amplitudes de probabilidades. Em 1980, o físico William Wootters desenvolveu uma abordagem semelhante para distinguir populações de sistemas quânticos, a partir do ângulo entre os estados que representam essas populações no espaço de vetores de estado (espaço de Hilbert).

Essa história é contada por John Wheeler, em entrevista no excelente livreto *The Ghost in the Atom* (1986), editado por Davies & Brown.

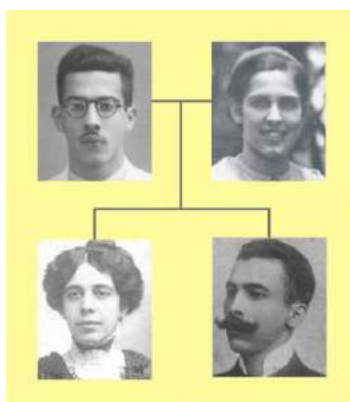
Podemos explorar as semelhanças entre a genética e a física quântica imaginando duas pessoas de famílias completamente diferentes que se casam. Podemos determinar a “distância” genética entre elas, comparando cada par de genes que elas carregam. Suponhamos que elas se casem e tenham dois filhos. A distância genética entre os filhos pode variar: ela pode ser nula, no caso de gêmeos univitelinos, ou pode ser máxima, igualando-se à distância entre os pais.



No caso quântico, a relação genética entre os pais é análoga à relação de ortogonalidade entre dois auto-estados quânticos (por exemplo, spin para cima e spin para baixo, ou o átomo localizado no ponto 1 e no ponto 2). Quando um casal tem uma filha, seu estado genético pode ser expresso como uma “superposição” dos estados dos pais. O segundo filho seria uma superposição diferente, com coeficientes de superposição diferentes.

Quando iniciamos o estudo de física quântica, temos a tendência de considerar que um auto-estado é fundamentalmente diferente de uma superposição de auto-estados. Depois, aprendemos que esta diferença não é fundamental, mas se refere à base que tomamos como referência. Isso pode ser ilustrado, na foto da família, imaginando que os filhos podem ser considerados os pais.

Se a distância genética dos filhos for máxima, igualando-se à dos pais (ou seja, os filhos são completamente diferentes), então um casamento entre eles pode levar a dois descendentes que tenham exatamente o código genético dos pais! Ou seja, a figura abaixo poderia representar corretamente uma família (ignorando o tamanho dos bigodes!).



Isso seria análogo ao caso quântico. Spin na direção (e sentido) $+x$ é a superposição de spin na direção $+z$ e na direção $-z$, mas, de maneira simétrica, spin na direção $+z$ é a superposição de spin na direção $+x$ e na direção $-x$. Nenhuma das duas descrições é superior: a que é mais útil é aquela em que a base de estados se identifica com os auto-estados do observável que o cientista resolveu medir.

Essa proximidade entre a física quântica (e toda física ondulatória) e a genética sempre me atraiu, porque seria um ponto de aproximação entre o meu trabalho de filósofo da física e o de meu pai, o geneticista Oswaldo Frota-Pessoa, falecido em 2010, e que aparece de óculos na foto da família.

58. Quântons, sedíveis e dragões: leituras realistas da complementaridade

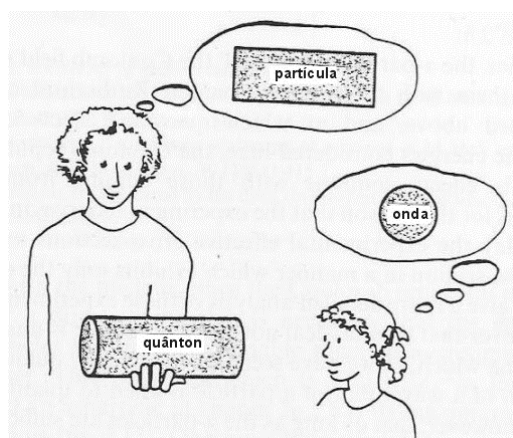
A interpretação da complementaridade, de Niels Bohr, afirma que um objeto quântico, como um feixe de elétrons, pode se manifestar ou como uma onda ou como uma partícula, nunca ambos ao mesmo tempo (ver o texto 10, “O yin-yang da complementaridade”). Ao enunciar

este princípio de complementaridade, Bohr não estava preocupado em dizer o que um elétron *é na realidade*: o que ele designava por “fenômeno ondulatório” ou “fenômeno corpuscular” descrevia apenas o padrão de *observações* em um experimento. Um fenômeno ondulatório apresentaria franjas de interferência (ou regiões em que não são detectados quanta), ao passo que um fenômeno corpuscular permitiria a inferência (“retrodição”) da trajetória de cada quantum detectado. Ambos os comportamentos não ocorreriam para um mesmo quantum observado.

Mas o que é afinal um elétron (ou qualquer outra entidade quântica), independentemente de como ele é observado? Bohr não achava que esta pergunta tivesse resposta, mas muita gente procurou fornecer uma interpretação realista da teoria quântica, consistente com o princípio de complementaridade. Dentre essas, há uma leitura minimamente realista da interpretação fornecida por Bohr, que adiciona apenas a tese de que um elétron, na realidade, é mais do que onda e mais do que partícula, que os atributos do elétron real é uma espécie de síntese dessas duas propriedades contraditórias.

Uma formulação bastante explícita desta posição é fornecida pelos físicos franceses Jean-Marc Lévy-Leblond & Françoise Balibar, em seu livro didático *Quantique: Rudiments* (1984), traduzido para o inglês como *Quantics: Rudiments of quantum physics* (1990). O que eles chamam de quânton (em Portugal, “quantão”; em francês e inglês, “quanton”) seria um objeto diferente de onda e diferente de partícula, mas que em diferentes experimentos se manifesta de tal forma que utilizamos esses termos clássicos. O filósofo argentino Mario Bunge também introduziu o termo “quânton”, de maneira independente, em seu livro *Treatise on basic philosophy* (1985).

A figura abaixo, retirada do livro de Lévy-Leblond & Balibar, representa metaforicamente a relação entre quânton, onda e partícula. De uma certa perspectiva, o quânton (análogo a um cilindro tridimensional) aparece como onda (círculo bidimensional); de uma perspectiva ortogonal, aparece como partícula (retângulo bidimensional).

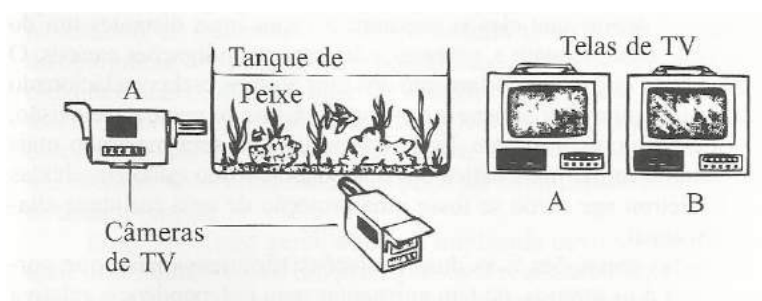


O “quânton” não deve ser confundido com o “quantum”. Este último é um termo observacional, aceito por todas as interpretações da teoria quântica, e corresponde à detecção da entidade quântica, que geralmente ocorre com energia discreta e de maneira pontual. Já “quânton” é um termo teórico, e seu uso pressupõe alguma tese teórica relativa à natureza real

da entidade quântica em questão (mas não adentraremos na difícil questão de quais seriam as propriedades que caracterizam cada quânton). Em suma, “quânton” seria a pretensa entidade quântica, “quantum” é o objeto observado.

Essa distinção não é nova: podemos mencionar semelhante distinção feita por John Stuart Bell (1975), que queria um termo mais realista para se referir ao um “observável” da mecânica quântica (posição, momento, energia, componente de spin, etc.), e assim cunhou jocosamente o termo *beable* (em inglês), cuja tradução seria algo como “sedível” (ser + ível), e seria um sinônimo de variável oculta.

A analogia da figura anterior é muito próxima a uma metáfora apresentada por David Bohm, no livro *Totalidade e a Ordem Implicada* (orig. 1980), já mencionado no texto 37, “A ordem implicada de David Bohm”. Trata-se de um aquário de peixe, que é gravado com duas câmeras de TV a partir de perspectivas ortogonais. Se a câmera A vê um determinado peixe por trás, a câmera B o pega pelo lado. Nas telas de TV, quem assiste não suspeitaria, inicialmente, de que se trata do mesmo objeto, pois as imagens são bastante diferentes. Mas quando o peixe se sacode, a sacudidela aparece simultaneamente nas duas telas de TV, e aos poucos o espectador vai percebendo as correlações entre as duas “partículas ictícas”.



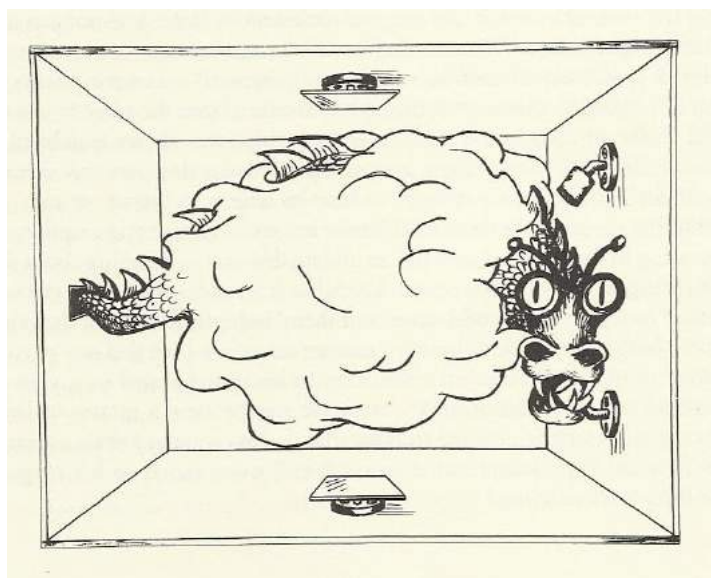
Esta figura faz uma analogia com a situação de duas partículas correlacionadas, como no paradoxo de EPR ou no teorema de Bell, e o que Bohm está sugerindo é que as duas partículas sejam perspectivas diferentes (cada uma em 3 dimensões) de uma entidade única, mais complexa, nas 6 dimensões do chamado “espaço de configurações”. Neste espaço de dimensão mais elevada não ocorreriam os efeitos de não-localidade que aparentemente ocorrem no laboratório (tal situação já era conhecida em 1927, como transparece em fala de Paul Dirac no Congresso de Solvay).

Tenho a impressão que Lévy-Leblond & Balibar não estenderiam seu conceito de quânton para essa entidade multidimensional proposta por Bohm, e falariam de “dois quântons” em experimentos de partículas correlacionadas.

Um dos primeiros a fazer uma leitura mais realista da interpretação da complementaridade foi o próprio David Bohm, em seu primeiro livro didático, *Quantum Theory* (1951), escrito antes da formulação de sua interpretação causal da mecânica quântica, a teoria da onda piloto (ver texto 23). O seguinte trecho (p. 161) exemplifica sua abordagem mais realista do que a de Niels Bohr:

“Vemos, então, que um dado sistema é potencialmente capaz de uma variedade infindável de transformações em que as velhas categorias figurativamente dissolvem, e são substituídas por novas categorias que cortam através das velhas. Assim, somos levados a uma concepção excepcionalmente fluida e dinâmica da natureza da matéria, uma concepção na qual um dado objeto pode sempre escapar de qualquer sistema bem-definido de categorias que possa ser apropriado sob um dado conjunto de condições, e que, de acordo com linhas clássicas de raciocínio, limitaria permanentemente seu comportamento de uma maneira definida.”

Outro físico próximo a Bohr, que interpretou sua visão de maneira mais realista, foi John Wheeler, cuja concepção a respeito do experimento de escolha demorada foi apresentada no texto 13, em que concluiu que temos o poder de atualizar, ou mesmo alterar, o passado. Sem querer retornar a esta conclusão controversa, vale a pena apresentar a versão de Wheeler para o quânton, que imaginou como sendo “o grande dragão esfumaçado” (*the great smoky dragon*):



Esta figura, desenhada por Field Gilbert, aparece no livro *Niels Bohr: A centenary volume*, organizado por A.P. French & P.J. Kennedy (1985), p. 151. O dragão esfumaçado está desenhado dentro de um interferômetro de Mach-Zehnder: seu rabo e boca estão bem localizados, mas o corpo está espalhado no espaço.

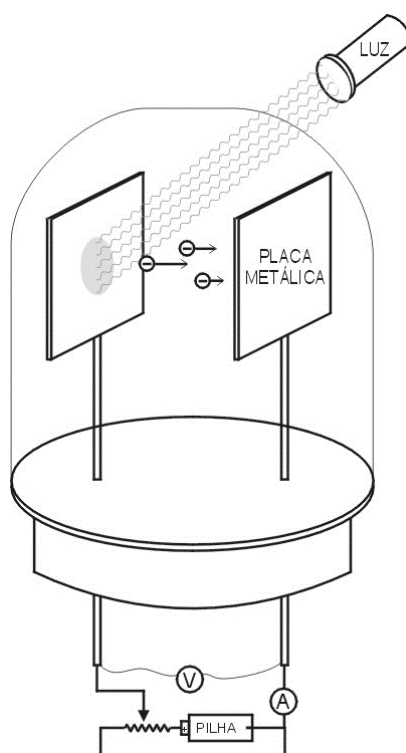
59. O Efeito Fotoelétrico (Fotoemissivo)

Um dos experimentos mais importantes para consolidação da teoria quântica foi realizado pelo norte-americano Robert Millikan em 1916, e é conhecido como efeito fotoelétrico, pois envolve a emissão de elétrons de uma superfície metálica provocada pela incidência de luz. Como há outros efeitos relacionando luz (fótons) e elétrons, o nome mais preciso deste fenômeno é “efeito fotoemissivo”.

O efeito fotoelétrico foi observado pela primeira vez em 1887, com radiação ultravioleta, que é uma radiação eletromagnética (assim como a luz visível) que tem um comprimento de onda menor (e portanto uma maior frequência de oscilação) do que a luz violeta. A descoberta foi realizada de maneira independente por três físicos: o alemão Heinrich Hertz, o sueco Svante

Arrhenius e o inglês Arthur Schuster. Nos anos seguintes, diversas propriedades deste fenômeno foram comprovadas experimentalmente por outros cientistas, culminando com os experimentos do húngaro-alemão Philip Lenard, em 1902.

A figura abaixo mostra um esquema da montagem experimental para se observar o efeito, na forma de um “fototubo”, usado tradicionalmente como sensor de luz (hoje em dia a maioria dos sensores de luz envolve outros princípios). A luz incide em uma placa metálica (emissora), localizada dentro de um tubo evacuado. A energia da luz é transferida para elétrons (de carga negativa) da superfície da placa, e estes se soltam do metal, sendo então atraídos em direção à placa da direita (coletora) por meio de um potencial elétrico positivo. Ao chegarem nesta placa, eles geram uma corrente elétrica no circuito abaixo do tubo, medido pelo amperímetro A. A voltagem entre as placas pode ser invertida, desacelerando os elétrons, sendo medida pelo voltímetro V.



Para entender o que está acontecendo, vale a pena considerar um modelo mecânico, que pode ser facilmente construído para fins didáticos (ver abaixo). Neste modelo, supõe-se que a luz consiste de partículas (fótons) com energia bem definida $E=hf$, onde f é a frequência de oscilação da onda luminosa associada, e h a constante de Planck. As três bolas da esquerda representam fótons com energias diferentes, correspondentes a cores diferentes.

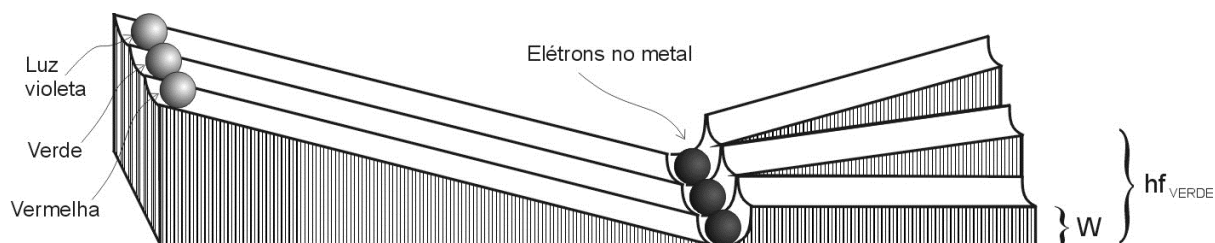
A bola vermelha tem menos energia, sendo semelhante a uma bola de plástico bem leve, e ao descer a rampa não consegue fazer com que a bola preta saia da cova em que se encontra e deslize pela pista horizontal. Isso representa o fato de que a luz vermelha geralmente não é capaz de gerar o efeito fotoelétrico (da mesma forma que ela não é capaz de sensibilizar um filme fotográfico, nos antigos laboratórios de fotografia). A energia de ligação do elétron na

placa metálica, W (chamada de “função de trabalho”), é maior do que a energia dos fótons de luz vermelha, hf .

A bola verde seria feita de madeira (ou seja, tem uma massa maior do que a anterior), e ao se chocar com a bola preta faz com que esta saia da cova e suba uma rampa, até o final, sem no entanto cair no precipício. Isso é análogo ao que acontece com a luz verde, que provoca a emissão do elétron (a bola preta sai do buraco) e ainda lhe dá energia para subir uma pequena rampa.

No caso real do efeito fotoelétrico, a “rampa” acima do nível de energia W consiste de um “potencial elétrico de corte” V_0 , que desacelera os elétrons e é suficiente para impedir que os elétrons “caiam no precipício”, ou seja, que eles atinjam a placa coletora. A este potencial de corte corresponde uma energia potencial eV_0 , onde e é a carga do elétron. Em outras palavras, a determinação do potencial de corte equivale a determinar a energia de cada elétron. O que se mostra então, para diferentes cores de luz, é que a energia dos elétrons emitidos é proporcional à energia dos fótons incidentes.

A relação entre essas grandezas foi deduzida teoricamente por Albert Einstein, em 1905: $eV_0 = hf - W$. A energia do elétron é igual à energia do fóton menos o trabalho para quebrar a ligação entre o elétron e o metal. Esta pode ser chamada a “lei de Einstein”, e foi esta lei que foi confirmada em 1916 por Millikan.



No caso da luz violeta, o fóton tem uma energia ainda maior. No modelo mecânico, isso corresponde a uma bola mais pesada, de ferro, que ao deslizar é capaz de fazer a bolinha preta subir uma rampa ainda mais íngreme, até atingir a borda (sem cair no precipício).

Discutimos até aqui o que na época era chamado de a “qualidade” da radiação, ou seja, o que para Einstein seria a energia associada a cada fóton. Mas a radiação também possui uma “quantidade”, que nada mais é (no modelo de Einstein) do que o número de fótons que incide no metal. Na segunda figura, se colocássemos sucessivamente bolinhas verdes na pista ocupada pela bolinha vermelha, cada bolinha verde teria energia para arrancar uma bolinha preta (elétron) e esta deslizaria até cair no precipício. Assim, contando o número de bolinhas pretas, teríamos a quantidade de fótons da radiação. No caso real do efeito fotoelétrico, essa quantidade é dada pela corrente elétrica medida pelo amperímetro A (o número de fótons seria dado pela intensidade da corrente dividida pela carga do elétron e).

Se a explicação dada for compreensível, então podemos entender alguns fatos observados pelos pioneiros do estudo do efeito fotoelétrico:

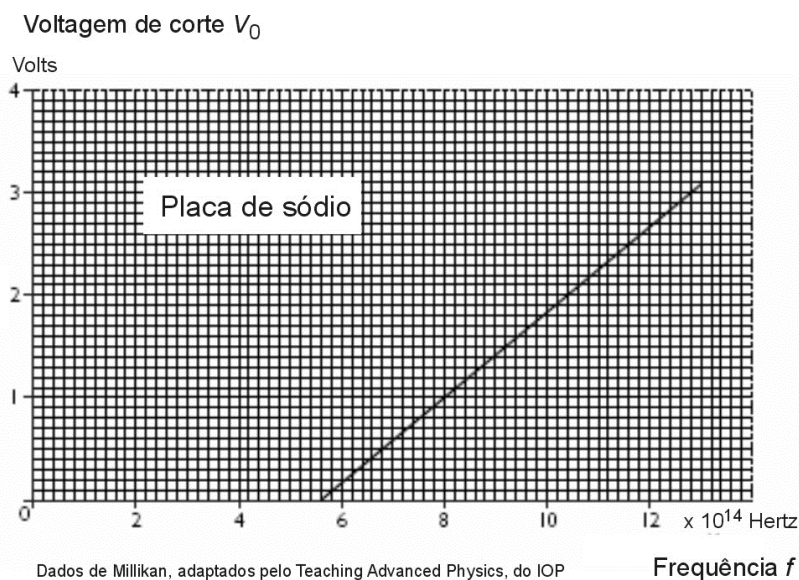
(a) Qualquer que seja o metal emissor, existe um limiar de frequência abaixo do qual não ocorre emissão de elétrons. Este limiar é dado pela energia de ligação W do elétron no metal: fótons com energia hf abaixo deste valor de W não conseguem emitir elétrons.

(b) Para uma dada frequência de luz (acima do limiar), quanto maior a intensidade do feixe, maior o número de elétrons emitidos. Isso foi descoberto pelo russo Alexander Stoletow, em 1889, e seria explicado pela tese de que apenas um elétron é emitido por cada fóton.

(c) Para feixes contendo o mesmo número de fótons, mas possuindo diferentes frequências (que estejam bem acima do limiar), o número de elétrons emitidos é o mesmo. Essa situação pode ser explorada para argumentar que um “meio fóton” nunca é observado. Por exemplo, podemos gerar um fóton ultravioleta que tem uma frequência que é duas vezes maior do que o limiar de frequência do efeito fotoelétrico. Assim, este fóton teria energia suficiente para emitir dois elétrons, pois sua energia é $2W$. Mas isso nunca acontece: no efeito fotoemissivo, cada fóton só pode levar à emissão de um único elétron, não dois.

(d) Acima do limiar, quanto maior é a frequência da luz, maior é a energia dos elétrons emitidos. Isso reflete o princípio de conservação de energia, envolvendo um fóton e um elétron, e é expresso matematicamente pela lei de Einstein, vista acima: Energia do elétron = $hf - W$.

Para quem gosta de gráficos, a figura abaixo apresenta, de maneira simplificada, a confirmação de Millikan para a lei de Einstein.



O efeito fotoelétrico é uma das mais importantes evidências de que a luz interage com elétrons de maneira discretizada, na forma de “quanta de energia” ou “fótons”. Mesmo assim, alguns autores argumentam que o experimento, por si só, não comprovaria a existência de quanta de radiação, pois o experimento poderia ser explicado supondo-se que a radiação eletromagnética (a luz) tem comportamento clássico e contínuo, e que a discretização é

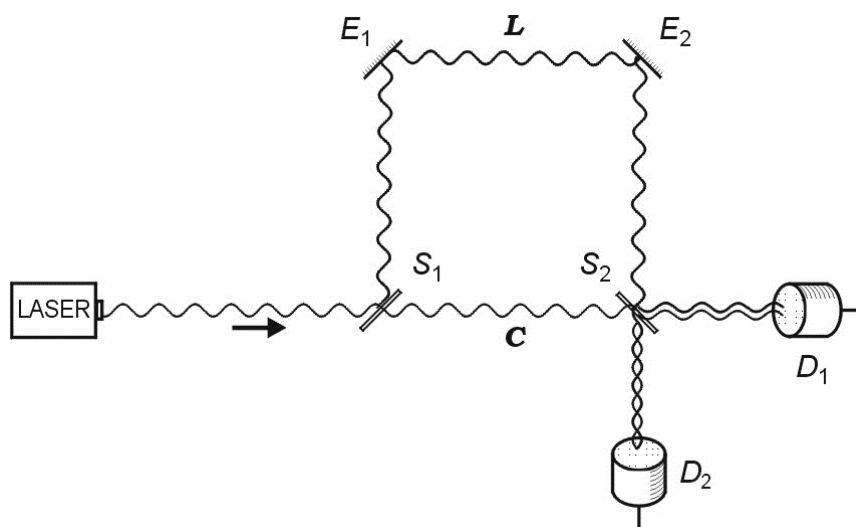
introduzida pelos elétrons presos a átomos. Este é o ponto de Lamb & Scully (1969), em um controvertido artigo disponível na web.

60. Superposições Temporais no Experimento de Franson

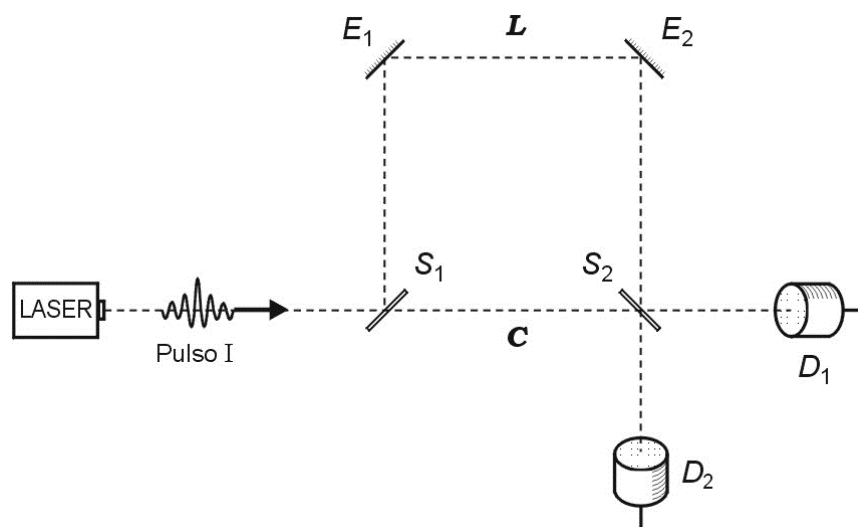
No texto 53, “Dr. Manhattan e as Superposições Temporais”, explicamos que a teoria quântica admite superposições temporais, ou seja, ela descreve estados em que o instante da ocorrência de um evento – por exemplo, um decaimento radioativo – não é bem definido. Essa situação pode ser modificada quando uma medição é efetuada – no exemplo, quando a partícula emitida no decaimento é detectada – e pode-se então falar em “colapso” do pacote de onda temporalmente superposto. Mas uma superposição temporal pode se manter mesmo depois de completada a medição, como veremos.

Naquele texto, prometemos descrever o experimento proposto por James D. Franson (1989), da Universidade de Johns Hopkins, em Maryland, EUA, que é uma maneira de confirmar que de fato há estados que são superposições temporais. Este experimento foi uma das primeiras propostas práticas de “interferência de duas partículas”, situação que conhecemos teoricamente das discussões do paradoxo de EPR e do teorema de Bell.

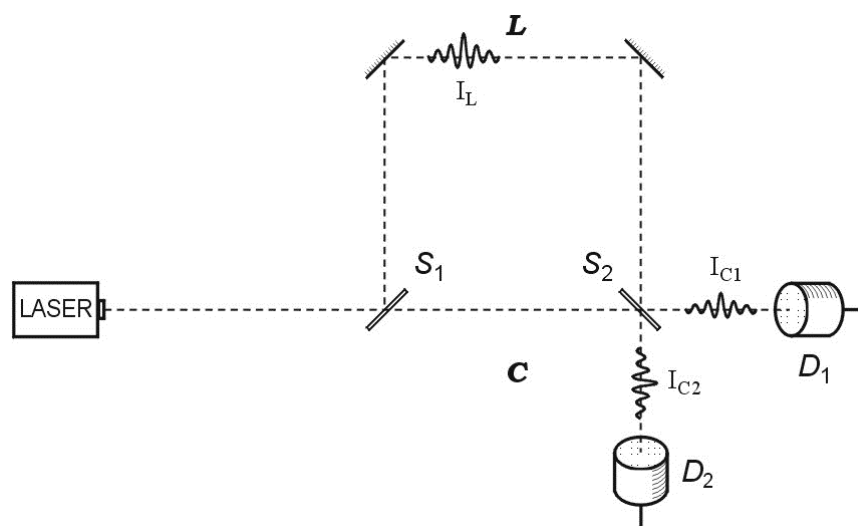
Antes de considerarmos a emissão de duas partículas correlacionadas, vamos considerar a situação em que um único fóton incide em um interferômetro de Mach-Zehnder, que estudamos no texto 13, “A Escolha Demorada”. Na figura abaixo, apresentamos uma versão assimétrica de tal interferômetro. Uma onda contínua divide-se no espelho semi-refletor S_1 , e ao ser recombinada em S_2 , o resultado é que as ondas que rumam para D_1 se superpõem construtivamente, ao passo que aquelas que vão para D_2 se superpõem destrutivamente, se cancelando. Assim, nada é detectado em D_2 , e toda luz incide em D_1 . O único detalhe estranho desta montagem é que a luz que segue pelo caminho C (curto) percorre um caminho bem menor do que a segue pelo caminho L (longo). Será que ocorre interferência nesta situação (a partir de S_2)? A resposta é sim, se o “comprimento de coerência” do feixe de luz for longo, ou seja, se as ondinhas que vão pelos dois caminhos continuarem oscilando em perfeita sincronia.



Para explorar a interferência temporal, vamos considerar dois pulsos mutuamente coerentes, separados temporalmente. Consideremos primeiro a figura abaixo, onde vemos um único pulso (I), contendo um único fóton, que vai adentrar ao interferômetro. O que acontecerá com ele? Haverá interferência? O fóton necessariamente cairá em D_1 , como no caso anterior?



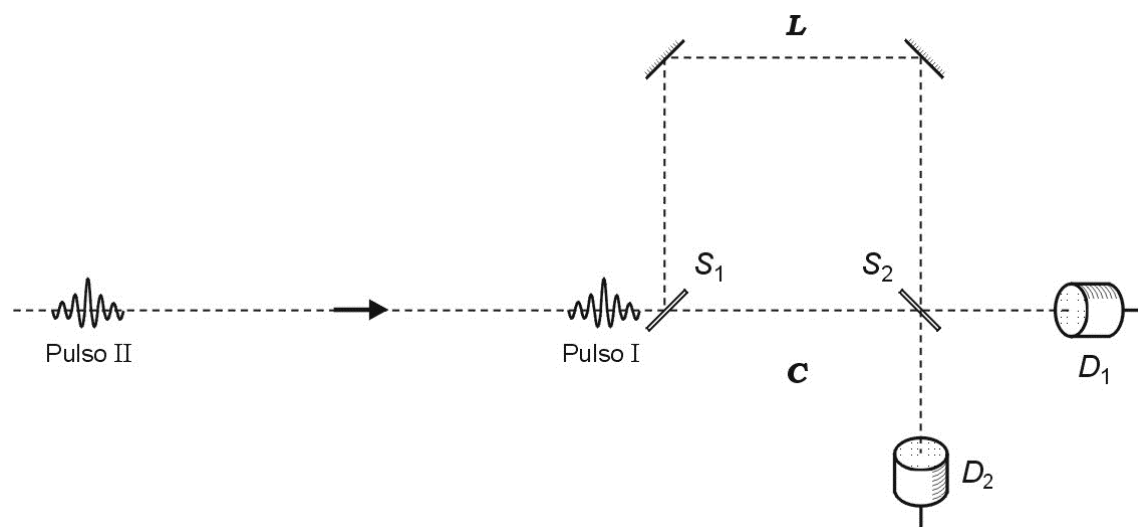
A resposta é não. Isso porque o pulso I se divide em dois em S_1 , mas a amplitude que rumou por C chegará em S_2 antes do que a outra amplitude (que rumou por L). Isso está ilustrado na figura abaixo:



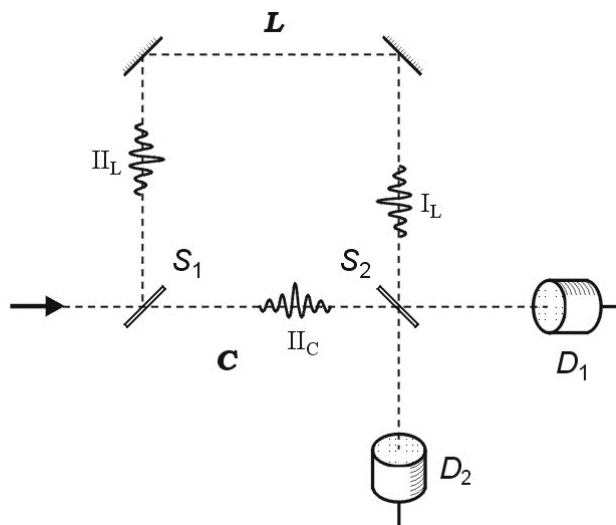
Vemos que quando o componente IC se divide em dois, após S_2 , o componente IL está ainda bastante atrasado dentro do interferômetro. Os pulsos não se encontram em S_2 , e assim não ocorre interferência. O pulso IC tem chances iguais de ser detectado em D_1 ou D_2 , e o mesmo ocorrerá com o componente IL . Assim, a probabilidade de cada detector disparar é $\frac{1}{2}$.

Agora vamos imaginar que haja dois pulsos (I e II) oscilando em perfeita sintonia (ou seja, coerentes), separados a uma distância $L - C$. Por construção, há apenas um único fóton associado a esses dois pulsos. Em outras palavras, os dois pulsos são emitidos de um mesmo

processo, em tempos diferentes, e assim temos uma superposição temporal de estados (veremos mais adiante como isso é realizado na prática).



O que acontecerá nesta situação? Ora, o primeiro pulso, após S_1 , se divide em IC e IL. O segundo pulso vem a seguir, e também se divide em dois: IIC e IIL. O que acontece de diferente é que IL e IIC interferem em S_2 , como vemos na figura abaixo. Nesta figura, o pulso IC já inciduiu nos detectores (após se dividir em dois).

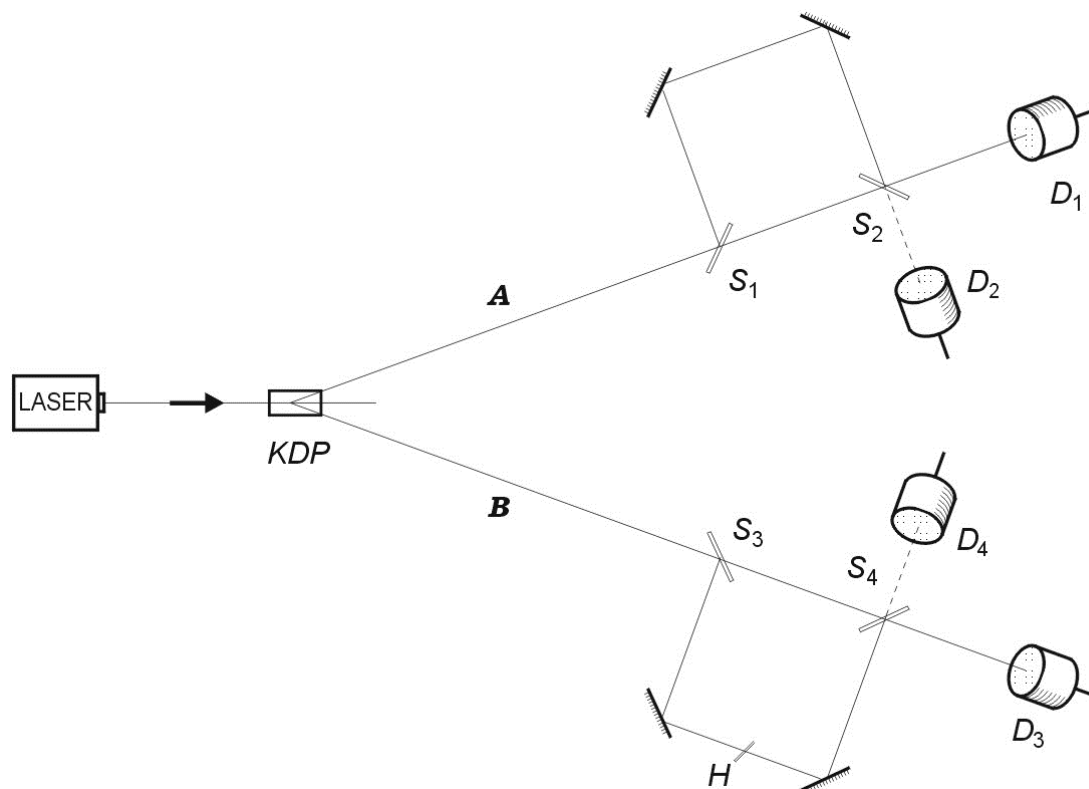


Quando as amplitudes IL e IIC interferem em S_2 , a superposição construtiva ocorre em direção a D_1 (e nada rumo para D_2). Já nos casos dos pulsos IC e IIL , a probabilidade de incidência em cada detector é igual. Assim, a probabilidade resultante de a detecção ocorrer em D_1 é $\frac{3}{4}$, e em D_2 é $\frac{1}{4}$.

Este experimento bastaria para verificar que um átomo, que emitisse as duas amplitudes de pulso I e II de maneira coerente, não tem um instante de emissão bem definido. No caso em que o fóton detectado está associado à chegada de IC ou IIL (em qualquer dos detectores), ocorre um colapso para um instante de emissão bem definido. Mas no caso em que o pulso

detectado em D1 ocorre em um instante consistente com a chegada de IL e IIC (que chegam juntos), o evento de emissão original, do átomo, permanece em uma superposição temporal!

O problema com esse arranjo acima está na preparação de uma superposição do tipo desejado, que tem sido chamado de “dupla fenda temporal”. Como preparar tal dupla fenda temporal? Uma solução está na geração de um par de fótons correlacionados, por um processo chamado “conversão paramétrica”, como foi feito nas implementações experimentais da montagem de Franson, realizadas em 1990 por dois grupos de físicos: Ou, Zou, Wang & Mandel, da Universidade de Rochester, e Kwiat, Vareka, Hong, Nathel & Chiao, da Universidade da Califórnia, em Berkeley, e esquematizadas na figura a abaixo:



O cristal de KDP tem propriedades de óptica não-linear, e o que acontece com o feixe contínuo de laser é que um par de fótons é gerado pelos caminhos A e B. Porém, o instante de geração desse par é indeterminado, ou seja, o par de fótons é gerado em uma superposição contínua de estados temporais.

Pois bem, vamos supor que um fóton é detectado em D1. Há dois caminhos associados a esta detecção, envolvendo os caminhos curto e longo (após seguir por A). Assim, este fóton detectado é gerado a partir de uma superposição temporal de eventos (pois os dois caminhos possíveis envolvem tempos de percurso diferentes).

Isso é confirmado pelo que ocorre do outro lado, após o caminho B. O colapso em D1 provoca um colapso também da partícula em B, e isso instantaneamente, de maneira “não-local”. O onda que incide no interferômetro em B pode ser considerado (por retrodição) como a soma de dois pulsos, justamente aqueles que interferem construtivamente em D3, que são IL

e IIC (que vimos anteriormente), incidindo no mesmo instante que o fóton detectado em D1. Porém, a taxa de coincidência não é 100%, pois para os dois pulsos que rumam por B, pode também ocorrer a detecção de IC e IIL, em instantes levemente diferentes do instante de detecção em A. Assim, a taxa de coincidência temporal de detecções em D1 e D3 é de apenas 50%.

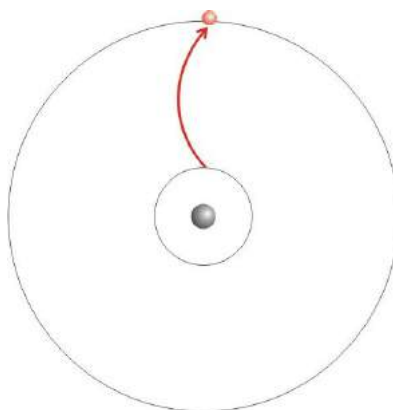
Tal resultado foi confirmado experimentalmente, corroborando que a noção quântica de superposição temporal de estados leva a previsões experimentais corretas.

Tal efeito é “não-local” porque as ondas colapsadas em ambos os lados (A e B) estão correlacionadas, mas tal colapso só pode ser atribuído após a detecção em um dos braços (a situação é, naturalmente, simétrica, não importando onde ocorre a primeira medição, se em A ou B). Sem a ocorrência das medições, o estado permaneceria sendo uma superposição temporal contínua (e não envolvendo apenas dois instantes, associados à geração dos dois pulsos C e L).

Pergunta: levando em conta a Fig. 1 deste artigo, pode acontecer de a primeira detecção ocorrer em D2 (ao invés de D1)?

61. Os Estados dos Elétrons nos Átomos

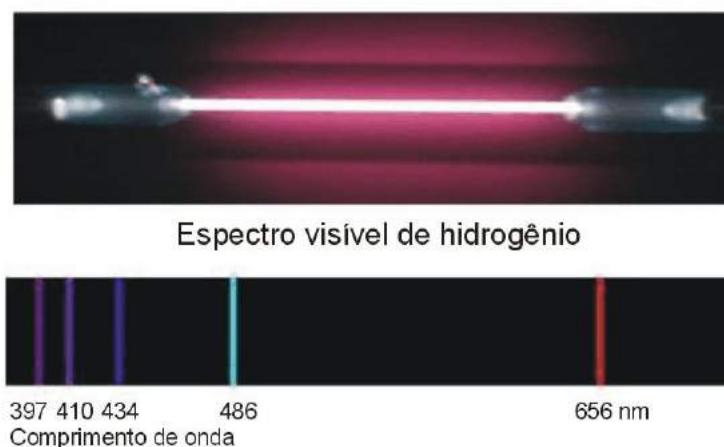
Um dos caminhos que levaram à descoberta da Física Quântica foram os estudos sobre a natureza do átomo. A realidade dos átomos foi um ponto bastante discutido no séc. XIX, mas a partir de 1906 a grande maioria dos cientistas se convenceu da existência de átomos. Por volta desta época, o trabalho pioneiro de Max Planck (1900) sobre a quantização de energia começou a despertar interesse, e era natural que vários cientistas tentassem elaborar um modelo quântico para o átomo. Os primeiros a tentar foram Arthur Haas (Viena, 1910) e John Nicholson (Cambridge, 1912), mas eles não sabiam ainda que o átomo tem um núcleo duro de carga positiva, que é cercado por elétrons negativos, fato estabelecido por Ernest Rutherford (Manchester, 1911). Com esta informação, seu aluno Niels Bohr conseguiu, em 1913, construir seu famoso modelo quântico do átomo de hidrogênio.



O átomo de hidrogênio tem apenas um elétron, que normalmente fica na órbita mais interior, o nível fundamental $n=1$. Mas quando ele recebe energia, ele “salta” para algum outro nível, que apesar de estar vazio, é bem definido. Na figura acima, o elétron salta para o nível $n=2$. Após ficar neste nível durante alguns nanossegundos, ele decai de volta para o estado fundamental, emitindo luz cuja energia $E = hf$ é igual à diferença de energia entre os níveis

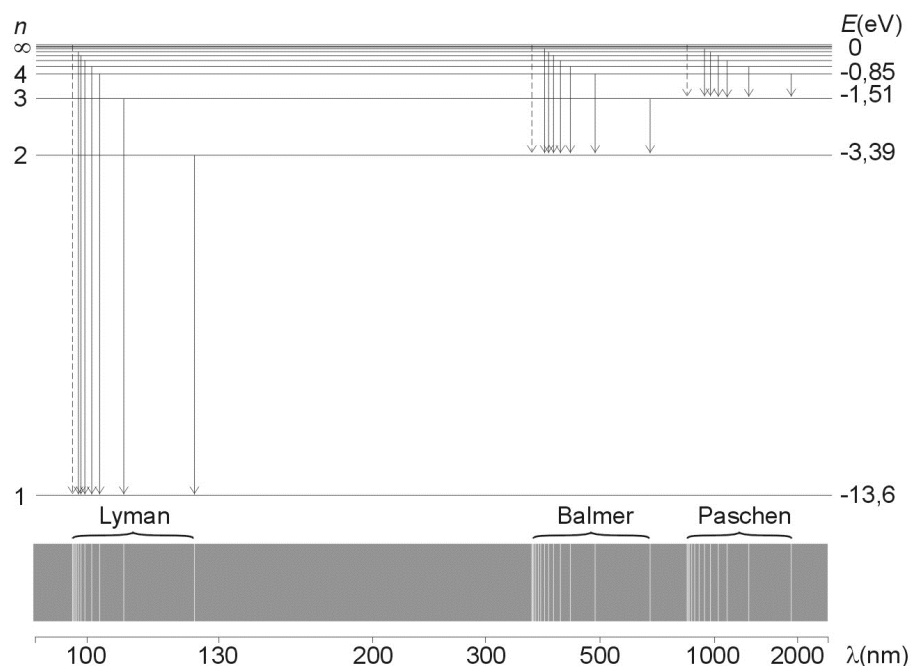
$n=1$ e $n=2$. Nessa expressão para a energia da luz, h é a constante de Planck e f a frequência da luz emitida.

Quando a luz de uma lâmpada de hidrogênio passa por um prisma, percebe-se que a luz é composta por cinco raias bem definidas, conforme a figura abaixo. Cada raia é caracterizada pelo seu comprimento de onda, em unidades de nanômetros (nm) (lembrando que a frequência vezes o comprimento de onda fornece a velocidade da luz). A figura mostra o espectro de luz visível do hidrogênio, mas há também raias invisíveis, algumas no ultravioleta e muitas no infravermelho.



A teoria de Bohr conseguiu dar conta das principais raias emitidas pelo hidrogênio, que seguem um padrão matemático razoavelmente simples, esboçado na parte de baixo da figura seguinte, adaptada do livro didático de Eisberg & Resnick, *Física Quântica*. As raias visíveis fazem parte da série de Balmer.

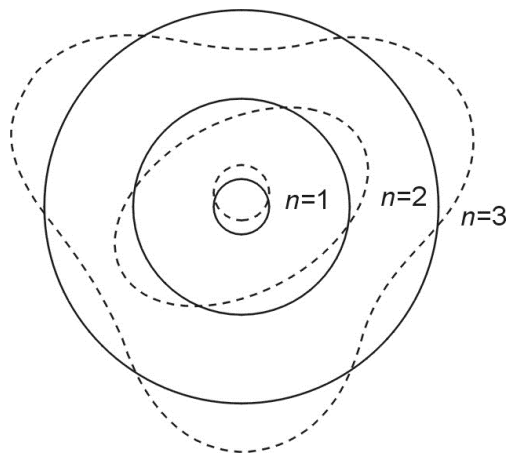
A parte de cima da figura indica quais os níveis envolvidos no salto do elétron. A energia da luz emitida é a *diferença* entre as energias de dois níveis de um elétron do átomo. Hoje reconhecemos que cada uma dessas linhas está associada a um único fóton de luz detectado, e que cada um desses fótons se originou do decaimento de um único elétron, entre dois níveis. Os números $n=1,2$, etc., indicam a energia de cada nível, cujo valor numérico (em unidades elétron-volt) está indicado na figura.



Como devemos imaginar esses elétrons? De início, eles eram concebidos como partículas, como bolinhas que girariam em torno do núcleo atômico, como se fossem planetas.

Esse retrato começou a mudar com o trabalho de Louis de Broglie, em 1924, que forneceu uma explicação para as órbitas discretizadas do modelo de Bohr, baseado na noção de dualidade onda-partícula. O elétron no átomo de hidrogênio teria uma onda associada, e esta onda teria um comprimento de onda L dado por h/p , onde h é a constante de Planck e p o momento do elétron (ou seja, sua massa vezes velocidade). Tal comprimento de onda variaria com a raiz quadrada do raio da órbita do elétron.

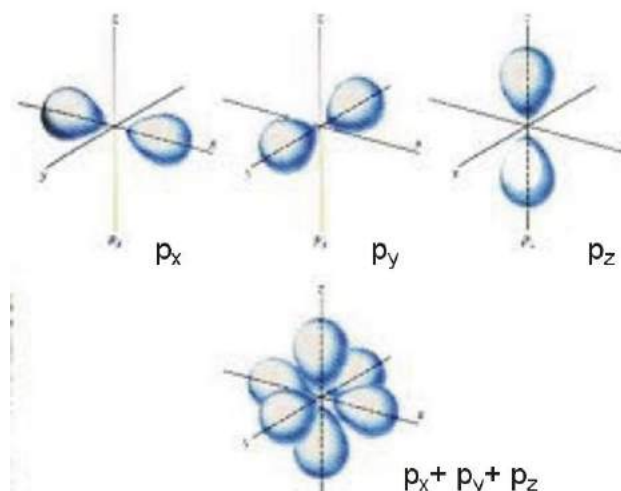
De Broglie mostrou que as órbitas para o átomo de hidrogênio são justamente aquelas cujas circunferências correspondem a um número inteiro do comprimento de onda do elétron. As órbitas corresponderiam assim às “ondas estacionárias” (no sentido usado na física ondulatória clássica) em torno do núcleo (ver figura abaixo). Para estes raios, o que ocorreria é que a onda associada ao elétron se move circularmente em torno do núcleo, e quando ele dá uma volta completa, os máximos se encontram em fase, de forma que há superposição construtiva. Nas regiões fora destas órbitas estacionárias, as ondas se superpõem em cada ponto às vezes construtivamente, às vezes destrutivamente, de maneira que, na média, elas se cancelam.



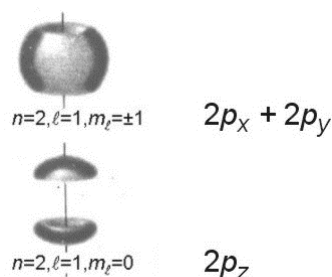
No modelo de Bohr, os níveis de energia são numerados por $n = 1, 2, 3$, etc. A partir de 1925, a nova Mecânica Quântica passou a identificar três outros números quânticos. Um deles está associado ao momento angular do elétron, ou seja, ao movimento circular do elétron em suas órbitas, e é representado pelas letras s, p, d, f , etc. ou pelos números $L = 0, 1, 2, 3$, etc. Assim, os subníveis de um átomo de hidrogênio corresponderiam aos estados $1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d, 4s, 4p, 4d, 4f$, etc., mas a energia de cada nível, na ausência de campos externos, seria dada apenas por n . Já em átomos com mais de um elétron, os subníveis s, p, d, f , etc. têm energia diferente, devido à influência dos outros elétrons. Quando colocado em um campo magnético externo, esses subníveis se desdobram mais ainda, no chamado efeito Zeeman normal, regido pelo terceiro número quântico m .

Para a Mecânica Quântica, um estado de um elétron é representado pela chamada “função de onda” $\Psi(x,y,z)$, que corresponde a um certo estado $|\Psi\rangle$ na notação de Dirac. O módulo quadrado $|\Psi(x,y,z)|^2$ fornece a função de probabilidade de se encontrar um elétron nos diferentes pontos x,y,z , também chamado de “densidade eletrônica”.

Para exemplificar, tomemos como nosso sistema de estudo o subnível $2p$ do átomo de hidrogênio. Para este sistema, os livros didáticos mencionam que há três “orbitais”, conforme aparecem na linha superior da figura abaixo, em azul. Esses três estados recebem os nomes de p_x, p_y e p_z . Na parte de baixo da figura, representa-se a mistura desses auto-estados do momento angular, correspondendo ao autovalor $L = 1$. Na verdade, a superposição coerente dos três estados p fornece uma função de onda esfericamente simétrica (invariância angular), e não como indicado na parte de baixo da figura. Já vimos imagens semelhantes de densidade eletrônica no texto 25, “É possível ver um átomo?”.



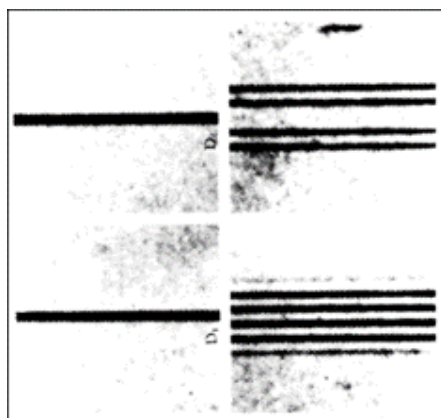
Uma representação um pouco diferente é apresentada na figura abaixo, modificada do texto Eisberg & Resnick, para a representação do subnível $2p$. Duas figuras são apresentadas, correspondendo a auto-estados de energia (no caso, o nível $n=2$), significando que cada estado é estacionário, ou seja, se o elétron está inicialmente neste estado, ele permanece nele indefinidamente. Cada estado é também auto-estado do momento angular, correspondendo ao momento angular $L=1$. A diferença dos dois estados indicados abaixo é que eles correspondem a autovalores diferentes do componente de momento angular, o terceiro número quântico m . O de cima é a superposição dos auto-estados para $m = +1$ e -1 , e o de baixo corresponde ao autovalor $m = 0$.



Segundo o *princípio quântico de superposição*, dados dois estados possíveis de um sistema, sua soma ponderada também é um estado possível. Isso significa que o estado do elétron pode ser uma soma dos dois estados representados na figura acima. A parte de baixo da figura ($2p_z$) refere-se ao mesmo estado que o diagrama p_z da figura anterior (em azul), apesar de estar desenhada diferente. Na figura acima, fica claro que a soma das duas figuras fornece uma função de onda esfericamente simétrica, o que não é visto na figura azul, que aprendemos nos cursos de química do ensino médio. Esse estado esfericamente simétrico é o que descreve um átomo isolado (da mesma forma que a molécula de amônia isolada foi vista como sendo esfericamente simétrica, no texto 55, “A pirâmide dupla da molécula de amônia”).

A simetria esférica é quebrada ao se impor um campo externo ao átomo, campo esse que pode ser elétrico (levando ao efeito Stark) ou magnético (levando ao efeito Zeeman). Os níveis para diferentes números L e m se desdobram em energias diferentes. A figura abaixo foi obtida por

Pieter Zeeman, em torno de 1896. Vemos como duas linhas espectrais do sódio são desdobradas em várias linhas, na presença de um campo magnético.



No modelo atômico de Bohr, um elétron só pode atingir um único nível energético. Na Mecânica Quântica mais completa, um elétron pode estar numa superposição de níveis energéticos, especialmente quando esses níveis estão próximos, como os do lado direito da figura acima.

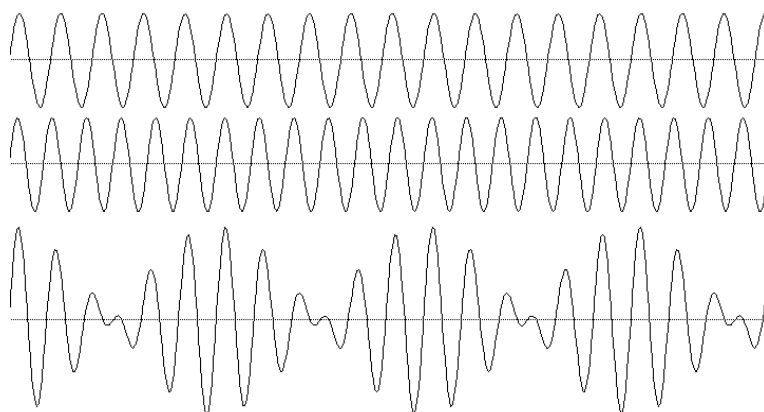
No próximo texto, veremos como podemos verificar a presença de tal superposição de estados m diferentes, através de um fenômeno chamado “batimentos quânticos”.

62. O que são Batimentos Quânticos?

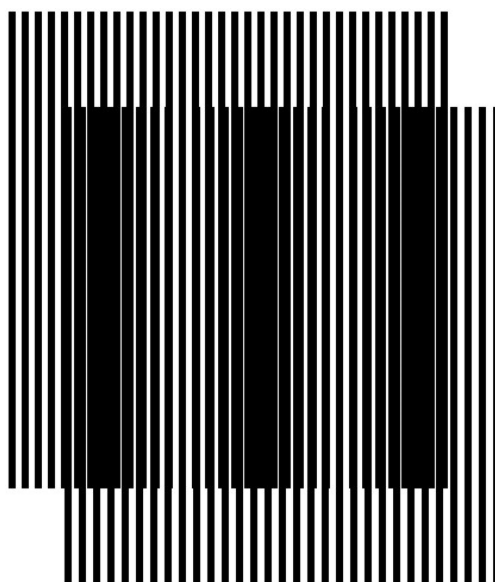
No texto 55, “A Pirâmide Dupla da Molécula de Amônia”, exploramos um sistema que exhibe batimentos quânticos. O que é isso?

Começamos com um exemplo da física ondulatória clássica, associado ao som produzido por um instrumento musical. Há programas simples na web onde se podem gerar sons contínuos de diferentes timbres, como o NCH Tone Generator, utilizado para fins didáticos: <http://www.nch.com.au/action/tnsetup.exe>. Com este programinha, podemos gerar um som puro, como o lá de 440 Hertz (440 oscilações sonoras por segundo). Podemos também gerar simultaneamente dois sons de frequências puras, por exemplo 440 e 445 Hz. Ao escutarmos esses dois sons simultaneamente, ouvimos uma oscilação de batimento, um UAUUAUAU, que oscila 5 vezes por segundo. Se o par escolhido for 440 e 441 Hz, a oscilação de batimento terá 1 Hz, ou seja, oscilará uma vez por segundo.

É possível entender esse fenômeno auditivo considerando que o som é uma onda mecânica (ou de pressão) no ar. Na figura abaixo, vemos duas ondas de comprimento de onda levemente diferentes (ou seja, frequências diferentes), e abaixo vemos a soma dessas duas ondas. A onda resultante tem uma frequência que é a média das frequências anteriores, mas há um envelope nessa onda que oscila na frequência de batimento, que é a diferença (ou seja, a subtração) entre as duas frequências originais. É este envelope que gera o som de UAUUAUAU.



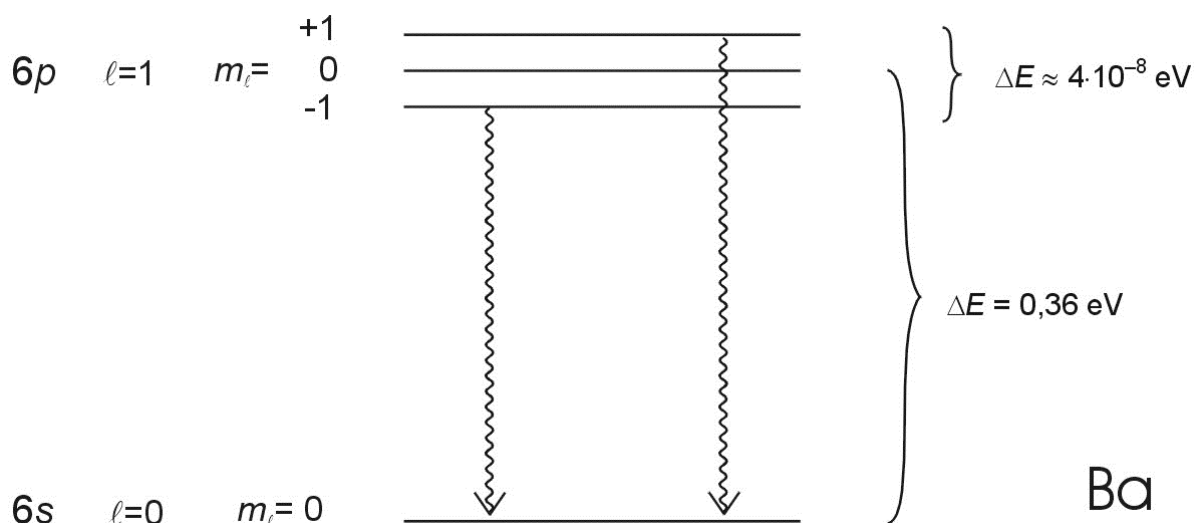
Há um efeito visual semelhante ao dos batimentos sonoros, conhecido como *padrão moiré*, onde a palavra “moiré”, vinda do francês, se pronuncia “moarê”. Na figura abaixo, vemos dois padrões de linhas paralelas, com espaçamento levemente diferente. Os dois padrões primários têm a mesma largura total L , mas o de cima tem 34 linhas por L , ao passo que o de baixo tem 31. A diferença entre os dois é 3, o que corresponde ao número de linhas do padrão moiré na largura L .



Vemos assim o que são os batimentos: a geração de um padrão de frequência mais baixa, a partir da superposição de dois padrões de oscilação semelhantes, mas levemente distintos.

No domínio da Física Quântica, batimentos podem ser detectados quando um átomo está em uma superposição de estados energéticos diferentes. No texto 61, “Os estados dos elétrons nos átomos”, vimos que um estado de um átomo pode se desdobrar em um conjunto

de subníveis de energias distintas. Considere a figura abaixo, representando os subníveis energéticos de um átomo de bário colocado em um campo magnético (efeito Zeeman).



O estado fundamental do átomo corresponde ao elétron externo no nível 6s (números quânticos $n=6$, $L=0$, $m=0$). Devido ao campo magnético, o próximo nível acessível a este elétron, 6p (com $L=1$), passa a ser dividido em três linhas de energia levemente diferentes, cada qual associado a um componente de momento angular diferente ($m = -1, 0, 1$).

Um feixe de radiação infravermelha é então direcionado ao átomo. Esta radiação eletromagnética é semelhante à luz visível, mas tem um comprimento de onda menor. Sendo gerado por um laser, o comprimento de onda do infravermelho pode ser sintonizado no valor de 4,3 nanômetros, o que faz o elétron ganhar exatamente a energia do 0,36 eV, que o faz saltar para o nível 6p.

Além deste truque de sintonizar o laser na frequência (ou comprimento de onda) desejada, há um outro truque, que é produzir um pulso de laser bem curto, que dura apenas 1 picossegundo, ou seja, um trilionésimo de segundo (“10 elevado a -12 ” segundos). Levando em conta a relação de incerteza entre energia E e tempo t ($\Delta E \text{ vezes } \Delta t > h$), temos que a indeterminação na energia transmitida ao elétron é em torno de 0,004 eV, o que é cem mil vezes maior do que o espaçamento entre os três níveis 6p. Isso significa que o átomo é preparado em uma superposição de estados com energia bem definida.

Consideremos então que o átomo está preparado numa superposição de dois subníveis, um com $m = -1$ e o outro com $m = 1$. Podemos representar este estado por $|\Psi\rangle = \exp[i(E+)/h] |m=1\rangle + \exp[i(E-)/h] |m=-1\rangle$. Ficou um pouco complicado, mas neste caso não tem como fugir de uma fórmula!

Notamos que há dois termos, e que cada um é multiplicado por um “exponencial imaginário” envolvendo duas energias diferentes, $(E+)$ e $(E-)$. O nome “imaginário” se refere ao número i , que é a raiz quadrada de -1 . Quando se toma o exponencial de um número imaginário multiplicado pelo tempo t , isso resulta em uma onda contínua de frequência E/h (na verdade,

deixei de fora um fatorzinho 2π). Enfim, o aspecto importante deste estado $|\text{PSI}\rangle$ é que ele envolve dois termos que oscilam a frequências diferentes, $(E+)/h$ e $(E-)/h$. E daí?

E daí que, para medir a energia do átomo, devemos esperar ele decair para o estado fundamental $6s$, e aí medir a energia ou frequência da luz emitida. Cada elétron que decai permitirá a detecção de um único fóton no infravermelho. Podemos preparar bilhões de átomos de bário no mesmo estado $|\text{PSI}\rangle$, e assim detectar milhares de fótons emitidos.

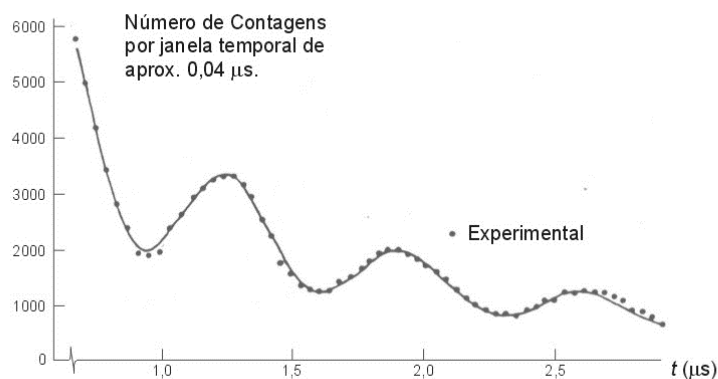
Qual é o estado da luz emitida no decaimento do estado $|\text{PSI}\rangle$ para o estado fundamental? Nesta caso, consideremos cada um dos termos de $|\text{PSI}\rangle$ em separado. O primeiro termo é $\exp[i(E+)/h] |m=1\rangle$. A luz emitida do estado $|m=1\rangle$ para o estado fundamental, que tem $m=0$, será circularmente polarizada no sentido antihorário, ou seja, $|\text{POL.}+1\rangle$; a luz emitida pelo estado $|m=-1\rangle$ será circularmente polarizada no sentido horário, ou seja, $|\text{POL.}-1\rangle$. Como o estado inicial $|\text{PSI}\rangle$ é uma superposição desses dois autoestados, o estado da luz emitida também será uma superposição, com os mesmos coeficientes, ou seja, $|\text{PSI-luz}\rangle = \exp[i(E+)/h] |\text{POL.}+1\rangle + \exp[i(E-)/h] |\text{POL.}-1\rangle$.

E agora? Como medimos o estado de polarização da luz? Através de polarizadores, como vimos no texto 49, “Um obstáculo pode aumentar o vazamento?”. Se usarmos um filtro de polarização circular, orientado para deixar passar apenas a luz de sentido antihorário, todos os fótons detectados corresponderão à energia bem definida $(E+)$. Se o filtro for orientado para deixar passar apenas a luz de sentido horário, os fótons corresponderão à energia $(E-)$.

Medimos assim, em cada caso, uma energia bem definida. Isso significa que o átomo estava em um estado de energia bem definida? Segundo a interpretação da complementaridade, sim, pois podemos aplicar o procedimento conhecido como “retrodição” (ver texto 30, “Retrodição é especulação?”). Mas segundo a interpretação ondulatória, não, pois o estado inicial é a superposição $|\text{PSI}\rangle$, que não tem energia bem definida. (Para um resumo dessas interpretações, ver o texto 35, “Por que há tantas interpretações da teoria quântica?”).

Agora, o que aconteceria se, ao medirmos a luz, ao invés de usar filtros de polarização circular, tivéssemos usado os convencionais filtros de polarização linear, a 0° e 90° ? Para fazer o cálculo, é preciso escrever $|\text{PSI-luz}\rangle$, visto acima, em termos de outra base de autoestados, aquela envolvendo os autoestados de polarização linear $|\text{POL.}0^\circ\rangle$ e $|\text{POL.}90^\circ\rangle$. Para fazer a transformação, basta considerar que $|\text{POL.}+1\rangle = |\text{POL.}0^\circ\rangle + |\text{POL.}90^\circ\rangle$, e $|\text{POL.}-1\rangle = |\text{POL.}0^\circ\rangle - |\text{POL.}90^\circ\rangle$, onde um coeficiente igual a “1 dividido por raiz de 2” multiplica os termos do lado direito das igualdades.

Ao se calcular, enfim, a probabilidade de detecção quando o filtro de polarização a 0° é colocado, obtém-se um termo proporcional ao cosseno da diferença das frequências, $(E+)/h - (E-)/h$, multiplicado por t . Isso corresponde a uma oscilação de batimento! Na figura abaixo, temos o resultado de um experimento efetuado por Dodd & Series (1976) para o cádmio.



O experimento consistia na irradiação dos átomos de cádmio com um pulso de laser. Após um certo tempo T , abria-se uma curta janela de contagem e contava-se quantos fótons (polarizados a 0°) chegavam ao detector. O experimento foi repetido várias vezes, e cada vez tomava-se um tempo T diferente, variando em $1/30$ de microssegundo. Por exemplo, quando T é 1,0 microssegundo, contaram-se em torno de 2000 fótons.

A curva final apresenta uma oscilação, que revela a frequência de batimento de aproximadamente 3 picos em 2,6 microssegundos, ou seja, 1,2 megahertz. Como a frequência de batimento é a diferença entre as frequências $(E+)/h$ e $(E-)/h$, podemos calcular a diferença de energia entre os subníveis atômicos a partir do gráfico: $\Delta E = 5$ bilionésimos de eV (ou seja “5 vezes 10 elevado a menos 9”). Isso pode ser comparado com a diferença de energia do caso do bário, visto duas figuras atrás.

No caso do experimento de batimentos quânticos, a interpretação da complementaridade não associa uma energia bem definida ao átomo. Neste caso, ela concorda com a interpretação ondulatória.

Em suma, experimentos de batimentos quânticos permitem medir precisamente pequenas diferenças de energia atômica, nos casos em que um estado de superposição quântica coerente, sem energia bem definida, existir no sistema atômico. Se não houver superposição de energia das ondas de um elétron, não haverá batimento.

Veremos, no texto seguinte, que batimentos quânticos foram recentemente detectados em moléculas biológicas!

63. A Nascente Biologia Quântica

Em 2007, dois grupos da Universidade da Califórnia, em Berkeley, trabalhando sob a supervisão do químico Graham Fleming, obtiveram evidências convincentes de que macromoléculas envolvidas na fotossíntese apresentam oscilações eletrônicas que só podem ser descritas pela física quântica.

O que eles observaram, para moléculas resfriadas a temperaturas baixíssimas, foram batimentos quânticos, que estudamos no texto 62, “O que são batimentos quânticos”. Vimos

que tais batimentos surgem quando um sistema possui duas (ou mais) vibrações de frequências muito próximas.

Sabe-se que quando a luz é absorvida por elétrons, em certos materiais, forma-se um estado excitado conhecido com “éxciton”, que envolve não só o elétron (de carga negativa) mas também o “buraco” (de carga positiva) deixado na material. Esses dois elementos mantêm-se ligados pela atração elétrica, e são considerados uma “quase-partícula”. Após um certo tempo, o elétron recombina com o buraco (ou seja, o éxciton decai), podendo emitir luz, como ocorre nos LEDs (diodos emissores de luz).

Éxcitons podem se propagar ao longo do material (sem que haja transporte de elétrons), como uma onda, e é assim que a energia absorvida pelo pigmento da macromolécula se transfere para o “centro de reação”, fora da molécula, que é onde ocorre a transferência de carga (no caso um elétron, não um mero éxciton) que inicia o armazenamento de energia (em açúcares) e a produção de oxigênio. Tradicionalmente, porém, supunha-se que a transferência dos éxcitons se dava de maneira clássica, com saltos entre sítios bem localizados, por causa do ruído do ambiente, que provocaria uma rápida perda da coerência quântica da excitação (vimos este processo de decoerência no texto 21, “A fronteira entre o quântico e o clássico”).

O que os dois grupos mostraram é que a transferência de éxcitons se dá, de fato, como a propagação de uma onda não-localizada. Além disso, como essas moléculas têm diversos centros absorvedores de luz (como ilustraremos abaixo), forma-se um estado que é uma superposição dos éxcitons gerados nos diferentes centros. Como a energia associada a cada um desses centros é distinta (devida a diferenças no ambiente molecular), pode-se detectar batimentos quânticos após lançar pulsos ultracurtos de laser e analisar a luz resultante.

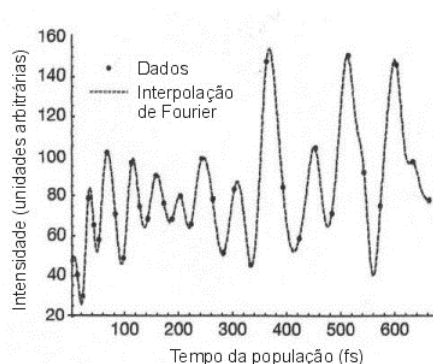
Um exemplo de molécula “antena”, que captura e transfere luz para fotossíntese, é o sistema estudado por Engel et al. (2007), conhecido como complexo de Fenna-Matthews-Olson (FMO), e presente em bactérias de enxofre verdes, que vivem a grandes profundidades em lagos e oceanos, em ambiente de pouca luz. Este complexo possui três unidades iguais, uma das quais está representada na figura abaixo (fonte: R.J. Sension, *Nature* 446, 12 abr. 2007, p. 740).



A energia luminosa é capturada a partir de oito átomos de magnésio espalhados pelo “clorosomo” (desenhado como bolinhas interconectadas). Na figura, um círculo indica um átomo de magnésio (em verde escuro) cercado por quatro átomos de nitrogênio (em azul). Forma-se assim uma superposição de éxcitons gerados a partir desses oito centros, cada qual com energia diferente, o que resulta em batimentos quânticos. O grupo de Engel mediu batimentos ao longo de 660 femtossegundos, o que para nós é curtíssimo (há um milhão de bilhões de femtossegundos em um segundo, ou seja, $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$), mas para uma molécula é relativamente longo.

Na figura, veem-se também as proteínas (em amarelo), que servem de sustentação para orientar a macromolécula de forma a transferir a energia eficientemente para os centros de reação, que contêm enxofre e ferro, e estão fora da figura.

O procedimento experimental e a teoria envolvida são bastante complicados. Podemos reproduzir uma série de dados, junto com a interpolação teórica, que mostra os batimentos quânticos:



Este experimento de 2007 foi realizado à baixa temperatura de -196°C , o que deixou em aberto qual seria o comportamento da antena de luz à temperatura ambiente. Finalmente, em 2010, dois grupos mediram batimentos quânticos à temperatura normal: o grupo de Engel, e um grupo em Toronto comandado por Gregory Scholes, que trabalhou com uma alga (Collini et al., *Nature* 463, 04 fev. 2010, p. 644). Este resultado foi importante, pois muitos cientistas acreditavam, conforme já mencionamos, que o ruído do ambiente impediria a manutenção da coerência quântica. Trabalhando com o complexo FMO das figuras acima, Panitchayangkoon et al. (do grupo de Engel) mediram vibrações eletrônicas que duraram 300 fs a temperaturas fisiológicas (metade do tempo de decoerência da amostra fria, mas ainda um resultado significativo).

Para tentarmos entender o que acontece na captura de luz e transmissão de éxcitons, nessas antenas associadas à fotossíntese, é importante visualizar a luz não como um conjunto de fótons incidentes, mas como uma onda que interage simultaneamente com os diversos centros absorvedores (em torno dos átomos de magnésio), gerando uma onda de éxcitons não-localizada, que é conduzida ao centro de reação. O comprimento de onda da luz incidente, no experimento, é de 808 nm (na região do infravermelho), maior do que o tamanho do clorosomo, que não passa de 200 nm (nanômetros).

Por outro lado, parece razoável dizer que a transferência (recepção) de um elétron, que ocorre no centro de reação e inicia a cadeia de reações fotossintéticas, acontece de maneira clássica, sem a presença de superposições quânticas. Seria só neste momento que se poderia identificar

a transferência de um quantum de energia da luz (o “fóton”) para o sistema fotossintético. Mas não se poderia associar um dos centros absorvedores de magnésio ao ponto exato em que o “fóton” foi absorvido: esta formação de um éxciton se dá de maneira distribuída na macromolécula, em uma superposição de estados bem-localizados.

Este processo coerente é mais eficiente do que o caso em que apenas um dos centros absorvedores localizados é estimulado. Não está claro para mim o porque disso, mas Engel et al. (1997, p. 784) mencionam que “estados de superposição formados durante um rápido evento de excitação permitem que a excitação reversivelmente faça uma amostragem de taxas de relaxamento entre todos os estados de éxcitons componentes, dirigindo assim, de maneira eficiente, a transferência de energia para encontrar o escoadouro mais eficaz para a energia de excitação (que, no complexo FMO isolado, é o estado de menor energia). Quando visto desta maneira, o sistema está essencialmente realizando uma única computação quântica, percebendo vários estados simultaneamente e selecionando a resposta correta, que é indicada pela eficiência da transferência de energia. Na presença da transferência de coerência quântica, tal operação é análoga ao algoritmo de Grover [...]”.

De qualquer forma, essa otimização da eficiência da transferência de energia tem gerado uma discussão sobre se esse processo quântico se consolidou nos organismos fotossintéticos através do mecanismo de seleção natural, como uma adaptação a um ambiente de pouca luz, ou se o processo quântico se consolidou independentemente de sua vantagem adaptativa, muito pequena em ambientes com muita luz.

Especula-se também sobre outros efeitos quânticos em outros sistemas biológicos, distintos de moléculas associadas à fotossíntese. Propostas foram feitas para explicar a orientação de pássaros pelo campo magnético da Terra, e também para explicar a sensibilidade que o olfato teria para detectar vibrações moleculares (ver P. Ball, *Nature* 474, 16 junho 2011, p. 273), mas nenhuma dessas propostas tem uma confirmação experimental convincente, pelo menos por enquanto. E também não há propostas experimentalmente confirmadas envolvendo efeitos de coerência quântica (superposições quânticas) no cérebro – pelo menos por enquanto.

64. Música Quântica?

Chico Science, em seu “Coco Dub (Afrociberdelia)”, de 1994, anuncia uma “música quântica”:

Cascos, caos, cascos, caos
Imprevisibilidade de comportamento
O leito não-linear segue
Pra dentro do universo
Música quântica?

<http://www.youtube.com/watch?v=P-DdzOJOaH4>

O que seria uma música quântica?

Antes de explorarmos esta questão, vale relembrar que o termo “quântico”, hoje em dia, adquiriu um novo significado. Ele não designa apenas a física que descreve átomos, radiação e estrutura moleculares. Com a difusão do movimento cultural conhecido como “misticismo

quântico”, ou “espiritualidade quântica”, que já exploramos em vários textos, o termo passou a designar qualquer atitude mais mística, em que a espiritualidade individual é vista como se integrando de maneira holista (sem separações) com a espiritualidade mais global. Isso tem levado à valorização de técnicas de auto-ajuda baseadas no pensamento positivo, o que pode ser chamado de “idealismo”, pois a mente teria o poder de influenciar diretamente a realidade. Nesse novo sentido, “quântico” pode ser definido como um “misticismo holista idealista”.

Assim, se buscarmos na internet a expressão “som quântico”, encontraremos por exemplo o site do Pillai Center para a ciência da mente, que ensina que haveria frequências de sons quânticos, como o “Ah” e o “Ara Kara”, que “movem as energias criativas que se encontram no centro sexual para o centro localizado entre os olhos, a área da glândula pineal”, ou que “resgatam sons primordiais no Universo para criação e manifestação”. Na verdade, tal concepção mística não tem nada a ver com a física quântica, mas se entendermos “quântico” como sinônimo de misticismo holista idealista, então fica clara qual é a concepção do Dr. Pillai.

O termo “quântico” foi adotado pelas correntes místicas para atribuir a essas concepções filosóficas uma pretensa fundamentação científica. Sabemos que essa fundamentação é controvertida, e rejeitada pela maioria dos cientistas, que trabalham na ciência ortodoxa. É importante os espiritualistas quânticos reconhecerem que a questão é controvertida. Cada um de nós é livre para desenvolver sua visão de mundo, mas quando chega o momento de decidir se vale à pena pagar uns R\$ 32 para adquirir um CD com sons quânticos, sinto-me no dever de esclarecer que os possíveis benefícios dessa técnica meditativa não têm nada a ver com a física quântica. Mas se entendermos “quântico” como “misticismo holista idealista”, então chamar o som “Ah” de quântico deixa de ser um abuso de linguagem.

Deixando de lado, então, o misticismo quântico, vamos tentar imaginar o que poderia ser uma música quântica, que de alguma forma incorporasse aspectos do mundo dos átomos.

Em 1997, Gilberto Gil lançava seu CD “Quanta”, e a letra da canção de mesmo nome mencionava o quantum da física como um “Fragmento infinitésimo, quase que apenas mental”. O grande físico brasileiro Cesar Lattes, da Unicamp, comentou no encarte do CD: “O ‘infinitésimo’ é uma ficção matemática. Quantum é o mínimo de ação (energia x tempo). O Quantum de ação é mais real do que a maioria das grandezas físicas: seu valor não depende do movimento em relação ao observador.”

Em 2003, o músico Jaz Coleman, com a ajuda de seu irmão físico Piers Coleman, compôs a peça “Music of the Quantum”, sem letra, que procurava exprimir musicalmente uma metáfora da dualidade onda-partícula, com um violino representando o som contínuo de uma onda, e um acordeão sendo dedilhado como se o som fossem partículas. A peça também buscava representar a emergência de novas propriedades em sistemas coletivos, ou seja, a passagem de um comportamento simples para um complexo (como o que ocorre com elétrons que se tornam supercondutores): <http://www.emergentuniverse.org/#/music>

Seria este um exemplo de música intrinsecamente quântica?

A música é transmitida por ondas sonoras. Por outro lado, a física quântica estabeleceu que toda matéria tem um aspecto de onda. Temos aí uma primeira analogia entre os dois campos.

Mas a teoria quântica afirma mais: na detecção de um objeto microscópico, ocorre transferência de uma quantidade discreta de energia, o quantum. Será que quando escutamos

música nós a escutamos em unidades discretas? A sensação do som se baseia no movimento de minúsculos cabelinhos no ouvido interno, e este sinal é finalmente convertido em impulsos eletroquímicos no nervo coclear. Estes impulsos eletroquímicos são discretizados (mas não na escala quântica), mas nós não percebemos essa discretização, de forma que a percepção que temos do som é basicamente contínua.

Isso sugere uma maneira de simular um som quântico: fazer com que o som seja escutado como notas discretas e bem definidas. Por exemplo, ao se tocar um acorde em um violão, as notas não seriam escutadas em conjunto, mas a cada momento uma única nota soaria. Isso talvez pareça com o som de um xilofone tocado rapidamente, mas sem que duas batidas soem simultaneamente.

Há na música moderna europeia (1949-55) o estilo do pontualismo, em que os tons são tocados um a um, em sucessão, sem a formação de estruturas de muitos tons. O pioneiro neste estilo foi Olivier Messiaen, cujo “Modo de valores e de intensidades” pode ser apreciado em: <http://www.youtube.com/watch?v=ME5laJctGCo>

Na pintura, o análogo desse estilo “quantizado” de fazer arte seria o pontilhismo, exemplificado neste detalhe da obra “Parada de circo” (1889) de Georges Seurat:



Se a música quântica for apenas uma forma de pontualismo musical, então ela não parece ser muito excitante. Dois aspectos de sistemas quânticos poderiam ser incorporados para se tentar construir um estilo de música mais original: (a) a existência de observáveis incompatíveis, como posição e momento linear, ou frequência e tempo; (b) a existência de sistemas emaranhados, estabelecendo correlações especiais entre pares de notas. Mas não imagino como isso poderia criar um pontualismo mais interessante.

Sendo assim, só me resta atribuir um prêmio simbólico à peça que mais se aproxima do ideal de uma música quântica, dentre as que pude pesquisar na web. E o prêmio vai para... “A música quântica do hidrogênio”, uma criação do Akasha Project, composto pelo artista sonoro alemão Barnim Schultze, auxiliado por Hans Cousto, que se baseou no espectro de frequências do átomo de hidrogênio (que vimos no texto 61) para gerar notas musicais tocadas individualmente, sobre o fundo de uma “descrição acústica holista”. Um vídeo desta peça com belas imagens do artista Vigor Calma encontra-se em: <http://www.youtube.com/watch?v=iiCuzP9flzg>