

# FÍSICA MODERNA E O PARADOXO DE ZENON

*Fernando Haas*

## **Resumo**

O paradoxo de Zenon de Eléa é revisto nas suas três versões mais famosas, a saber: a da dicotomia, a da corrida entre Aquiles e a da tartaruga e da flecha imóvel. Argumenta-se que a conclusão do paradoxo, pela inexistência de movimento, não se sustenta diante de técnicas matemáticas mais avançadas do que aquelas conhecidas na Grécia antiga. A seguir, a visão da física quântica a respeito da caracterização dos sistemas físicos é confrontada com a visão newtoniana e determinística. Em especial, são debatidas as idéias de trajetória e movimento de acordo com as físicas clássica e quântica. São apresentadas situações típicas evidenciando a dualidade onda-partícula, como a experiência da fenda dupla com elétrons. O paradoxo de Zenon quântico é apresentado, mostrando a inseparabilidade entre observador e observado na física quântica. São lançados questionamentos sobre o conteúdo epistemológico da física quântica e algumas interpretações a respeito do assunto.

**Palavras-chave:** paradoxo de Zenon; interação entre observador e observado; interpretação de Copenhagen; interpretação de de Broglie-Bohm; paradoxo de Zenon quântico.

## **1 Introdução**

Ao ser informado da possibilidade de se fazer na UNISINOS uma rodada de debates<sup>1</sup> sobre ciência e filosofia, imediatamente me lembrei de um assunto que ultimamente vem sendo alvo de um certo número de trabalhos nas revistas de ponta em física. Este assunto é o chamado “paradoxo de Zenon quântico”. A junção de uma idéia remanescente da filosofia grega, o paradoxo de Zenon, com a física quântica, me fez imaginar que este seria um tema interessante a ser trabalhado. Entretanto, foi com certo receio que me aventurei a preparar uma palestra e um artigo sobre

---

1 II Ciclo de Estudos Desafios da Física para o Século XXI: um Diálogo desde a Filosofia.

o assunto. De fato, não tenho uma sólida formação em filosofia. No máximo, tenho sido um leitor diletante de textos filosóficos, com predileção por Montaigne, Nietzsche e Schopenhauer, não necessariamente nesta ordem. Não muito de gregos, portanto... Além disso, apesar de ser físico, antes de iniciar a empreitada não havia me debruçado seriamente sobre nenhum artigo a respeito do paradoxo de Zenon quântico. A proposta de discutir o paradoxo de Zenon quântico, enfim, é uma ousadia da minha parte, com justificativa principalmente sobre minha curiosidade sobre o assunto. Para ser totalmente franco, conjecturei que estudar um novo tema poderia resultar em algum fruto para minha pesquisa como físico teórico. Creio que é sempre salutar e praticar o exercício de considerar um assunto novo.

À parte as citadas motivações ligeiramente egoístas (o *meu* aprendizado, a *minha* pesquisa...), farei um esforço sincero para que o leitor possa tirar algum proveito da discussão que segue. Uma dificuldade a mais neste sentido está na própria sutileza da física quântica. O caráter pouco intuitivo, a visão de mundo perturbadora que emerge da física quântica, tudo isto já foi considerado com certo grau de detalhe, inclusive em outras publicações do Instituto Humanitas Unisinos (Haas, 2006; Schäfer, 2005; Dionísio, 2004). Por uma questão de objetividade, nos referimos, deste modo, a estas publicações para o leitor que se sentir demasiadamente perplexo com o presente ensaio.

Vejamos então do que se trata o tal paradoxo de Zenon quântico, a começar pelo paradoxo de Zenon conforme surgido na Grécia Antiga.

### 2 Paradoxo de Zenon

Para o fanático por futebol, é quase impossível ouvir a expressão “paradoxo de Zenon” sem vir à lembrança o meia-esquerda Zenon, exímio batedor de faltas de Guarani, Corinthians, Portuguesa e Atlético Mineiro nas décadas de 1970 e 1980. Diga-se de passagem, neste mesmo time do Corinthians (campeão paulista em 1982 e 1983) havia outro “filósofo célebre”, Sócrates, de brilhante participação na seleção brasileira da Copa de 82. Este mesmo time ostentava o apelido de “democracia corinthiana”, pela voz ativa dos seus jogadores e pelo clima político da época, com a Campanha das Diretas e a luta pela redemocratização do país. Democracia, outra idéia grega. À primeira vista, portanto, é natural imaginar que o paradoxo de Zenon deva ser alguma jogada espetacular e improvável no futebol, algum drible, ou talvez um certo chute miraculoso que deixava cristalizados goleiros pelo mundo afora. A verdade não está tão longe assim desta fantasia, já que o paradoxo de Zenon envolve, de modo essencial, os conceitos de movimento, trajetórias e geo-

metria. Futebol, como se sabe, é coisa séria e está baseado nestes mesmos elementos. Zenon de Eléa (século V a.C.) na verdade não sugeriu apenas um, mas sim uma série de paradoxos, na tentativa de dar sustentação à visão de Parmênides, seu mestre. Mais especificamente, Parmênides questionava a informação sensorial segundo a qual o mundo está em constante mutação. O próprio movimento não seria mais do que uma ilusão dos sentidos. Zenon procurou apoiar esta idéia através de seu paradoxo mais famoso, conhecido como “o” paradoxo de Zenon, no qual apresentava elementos indicando que a existência de movimento estaria em contradição com as leis da lógica. Desta forma, por que não dizer, a própria ciência física estaria em questão. Na chamada mecânica clássica, que tem em Newton seu grande sistematizador, o objetivo principal é a descrição do movimento e das leis que o regem. Como aceitar uma ciência cuja base está na descrição do movimento, sendo este uma ilusão dos sentidos? Do ponto de vista prático, tecnológico, até seria esta uma tarefa aceitável. De fato, a mecânica clássica conforme formulada por Newton no século XVII deu início à moderna civilização tecnológica. Do ponto de vista da filosofia, da busca da verdade, entretanto, o estudo do movimento não seria mais do que um passatempo vão.

O mais famoso dos paradoxos de Zenon tem várias formulações. Uma delas pode ser colocada do seguinte jeito. Suponha que você queira percorrer uma certa distância. Antes de percorrer esta distância completa, é necessário percorrer a metade dela. Além disto, para percorrer a metade da distância total, é preciso percorrer a metade desta metade. Prosseguindo com o argumento *ad infinitum*, chega-se à conclusão de que jamais a distância total poderia ser percorrida. Como o valor numérico da distância completa é arbitrário, seria impossível sair do lugar. Isto que observamos ao nosso redor e a que chamamos de movimento, seria apenas uma ilusão de nossa limitada capacidade de compreender o mundo. Segundo a lógica, não deveria haver movimento. Nesta expressão, o paradoxo de Zenon também é conhecido como paradoxo da dicotomia, baseado na infinita divisibilidade de um segmento de reta.

Numa outra versão do paradoxo, Zenon faz intervir Aquiles, o grande atleta grego, e uma tartaruga. Aquiles, que é muito mais veloz que a tartaruga, se bate com ela em uma corrida, dando ao animal uma certa vantagem inicial. Após um certo tempo, Aquiles percorre a distância que os separava inicialmente. Entretanto, neste meio tempo a tartaruga avançou um pouco. É preciso, portanto, um tempo adicional para Aquiles alcançar o bicho. Ao percorrer a nova distância, Aquiles percebe que a tartaruga se deslocou um pouco mais e que será necessário um esforço extra para alcançá-la. Dando continuidade ao argumento, aparentemente a conclusão lógica seria a de que Aquiles jamais al-

cançaria a tartaruga. Entretanto, nós todos percebemos no dia-a-dia que objetos mais velozes terminam por ultrapassar os mais lentos. Mais uma vez, se tem a impressão de que nossos sentidos nos estão pregando uma peça.

Numa terceira formulação, o paradoxo considera uma flecha em pleno vôo. Em cada instante de tempo específico, a flecha estaria parada. Deste modo, não faria sentido que se movesse, já que um objeto que está parado não dispõe de nenhuma tendência de sair do lugar. O movimento seria apenas uma ilusão.

Em todas as versões apresentadas, o paradoxo pode ser elucidado graças à técnicas matemáticas que não estavam disponíveis na época de Zenon. Nas formulações envolvendo uma distância a percorrer e a disputa entre Aquiles e a tartaruga, o paradoxo se resolve graças ao fato de que é possível que a soma de um número infinito de contribuições resulte num número finito. Um exemplo talvez familiar ao leitor está nas séries geométricas, do tipo

$$1 + r + r^2 + r^3 + \dots + \frac{1}{1-r}, \quad (1)$$

onde  $r$  é um número real qualquer tal que  $r^2 < 1$ . Assim, por exemplo,

$$1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}^2 + \frac{1}{3}^3 + \dots + \frac{1}{1 - 1/3} = \frac{3}{2}, \quad (2)$$

um valor finito não obstante a quantidade infinita de termos que compõe a soma. Não resta dúvida de que a obtenção de uma soma finita a partir de uma infinidade de termos é algo que desnor-teia boa parte das pessoas. Algo que pode nos confortar um pouco, entretanto, é observar que os termos sucessivos na soma são cada vez menos relevantes. Por exemplo, seja a centésima potência de  $1/3$ ,

$$\frac{1}{3}^{100} = 1,94 \times 10^{-48}, \quad (3)$$

um valor assaz diminuto. Para quem não se lembra mais de como funciona a notação científica, o número acima corresponde aproximadamente a 0,000...01, onde existem 47 zeros após a vírgula. Enfim, cada novo termo contribui ainda menos para o valor final na soma na equação (2). Argumentos em torno de séries geométricas podem ser utilizados para solucionar o paradoxo de Zenon conforme suas versões da dicotomia e da corrida entre Aquiles e a tartaruga. Detalhes mais técnicos podem ser encontrados, por exemplo, em Sainsbury (2003).

Na versão da flecha, o paradoxo de Zenon se resolve quando percebemos que não é possível dizer que um objeto está parado *no* instante de tempo tal ou qual. Só faz sentido dizer que algo não se move quando comparamos as posições do objeto em instantes de tempo distintos. Esta noção se expressa mais corretamente através do conceito de *derivada*, uma das pedras fundamentais do cálculo diferencial e da mecânica clássica. Não entraremos em pormenores a este respeito aqui por se tratar de um assunto um pouco técnico demais. Nos basta observar que a velocidade de um objeto é uma derivada, a saber, a derivada (ou taxa de variação) da sua posição. Neste contexto, a distância percorrida pela flecha num intervalo de tempo arbitrariamente pequeno é também uma quantidade arbitrariamente pequena. A divisão entre uma distância arbitrariamente pequena e um intervalo de tempo arbitrariamente pequeno resulta num valor finito, a sua velocidade. Como Zenon não dispunha do cálculo diferencial, concluiu que toda e qualquer velocidade deveria ser logicamente nula, de maneira que não poderia haver movimento.

É justo observar, em defesa de Zenon, que é questionável a infinita divisibilidade de espaço e tempo. Na física atual, certos modelos para a gravitação quântica sugerem que o espaço e o tempo sejam discretizados a partir de uma certa escala extremamente diminuta. O espaço, por exemplo, adquiriria granularidade em escalas menores que  $10^{-35}$  metros. Neste contexto, as refutações ao paradoxo de Zenon apresentadas deixariam de ser adequadas. Por outro lado, se o espaço e o tempo não são infinitamente divisíveis, no mínimo os paradoxos de Zenon haveriam de ser reformulados. Por exemplo, o paradoxo da dicotomia deixaria de fazer sentido, já que um segmento de uma linha reta real, não matemática, não poderia ser dividido *ad infinitum*.

Antes de tratarmos do paradoxo de Zenon quântico, precisamos considerar alguns elementos da realidade quântica.

### 3 Colapso da função de onda?

Na física clássica, mais especificamente na mecânica clássica, os conceitos de trajetória, velocidade, posição, movimento, têm um papel preponderante. Se fosse possível conhecer de modo absoluto a velocidade e a posição de todas as partículas de um sistema mecânico num dado instante de tempo bem como as forças (interações) entre todos estes objetos, então, em princípio, seria possível conhecer a velocidade e a posição de todas as partículas em qualquer instante de tempo futuro. As trajetórias de todos os constituintes do sistema mecânico seriam conhecidas de modo exato. As dificuldades que haveria seriam apenas de natureza experimental, na obtenção da velocidade e posições das partículas num dado instante, e de natureza matemática, na resolução das equações descrevendo a dinâmica,

advindas das leis de Newton. Ou seja, este esquema clássico, newtoniano, padeceria apenas de obstáculos operacionais. Não haveria limites fundamentais sobre o quanto se pode conhecer sobre um dado sistema mecânico. Este conhecimento se resumiria à descrição do movimento no chamado espaço de fase, a saber: o conjunto de todas as posições e velocidades de todas as partículas do sistema. A evolução dos planetas, das estrelas e de todos os objetos ao nosso redor, obedeceria a esta formulação. Aos cientistas, caberia a caracterização precisa das forças atuantes. Exemplos destas seriam a força gravitacional, regendo a atração entre partículas materiais, e a força eletromagnética, regendo a interação entre partículas carregadas.

O modelo mecanicista assim constituído não deixa margem alguma ao acaso. Modelos probabilísticos seriam necessários apenas pela enorme dificuldade de se descobrir, na prática, o estado microscópico de um sistema macroscópico feito de um número muito grande de constituintes. Além disso, mesmo que se soubesse com precisão completa o estado do sistema num dado momento, ainda restaria o formidável problema de como resolver de modo exato as equações de movimento para a dinâmica, o que se consegue apenas em certos casos muito especiais. A título de ilustração, mesmo o prosaico sistema de três massas interagindo gravitacionalmente não é, em geral, solúvel de modo exato. O que dizer então de um sistema planetário ou de um sistema composto de um número muito maior de partículas?

Pelas razões enumeradas, modelos probabilísticos, como a mecânica estatística clássica, se fazem necessários. A mecânica estatística clássica, por exemplo, nos diz apenas que a probabilidade de todas as moléculas no ar de uma sala decidirem se concentrar no lado direito desta sala (asfixiando quem estivesse à esquerda) é extremamente pequena. Esta conclusão da mecânica estatística não necessita do conhecimento exato das trajetórias de todas as inúmeras moléculas do ar no recinto.

Conforme detalhado em outras oportunidades (Haas, 2006; Schäfer, 2005; Dionísio, 2004), a partir do início do século XX foi sendo descoberta uma variedade de fenômenos que teimavam em não se enquadrar no paradigma newtoniano. Isto culminou na chamada física quântica, ou mecânica quântica, que é a teoria física melhor testada até agora. A física quântica está longe de ser uma mera teoria sem conexão com a realidade, tendo um papel central na nossa sociedade tecnológica. Estima-se que 30% do PIB mundial desapareceria caso não existisse a mecânica quântica. Um exemplo disto está na informática, que leva em conta dispositivos eletrônicos, cujo funcionamento depende da física dos semicondutores, a qual é um capítulo da física quântica.

Na física quântica, ao invés do conceito de trajetória, o elemento fundamental é a chamada *função de onda*. Para sermos mais precisos, numa formulação ainda mais geral, o objeto es-

sencial da física quântica é o chamado *operador densidade*, mas, para nossos propósitos, podemos nos contentar unicamente com a função de onda. A função de onda é um objeto matemático que permite computar a *probabilidade* de, num dado instante de tempo, uma partícula assumir uma certa posição e uma certa velocidade. Ao invés de trajetórias determinísticas, uma coleção infinita de velocidades e posições é admissível em cada instante de tempo, com maior ou menor chance. É como se o acaso entrasse de sola na existência. Einstein foi um dos mais críticos opositores a esta concepção, como se pode ver pela sua frase “Deus não joga dados”. Já se comentou (Oliveira, 2006) que aparentemente não apenas Deus joga dados como também o diabo sacode a mesa...

Enquanto a idéia de trajetória é algo palpável e até visualizável para sistemas macroscópicos, a função de onda já é um objeto bem mais abstrato. Não é a função de onda em si que parece ter alguma realidade física diretamente verificável, e sim as probabilidades (potencialidades) que dela decorrem. Entretanto, este grau mais elevado de abstração matemática não chega a causar tanto estranhamento. Trata-se de algo mais radical. Do que se está falando é de uma eventual inconveniência do conceito de trajetórias. Num exemplo talvez familiar, pensemos nos elétrons ao redor do núcleo atômico. Na física quântica, não faz sentido imaginar que estes elétrons meramente descrevam trajetórias semelhantes às dos planetas ao redor do Sol. Inclusive, se pode demonstrar que tal descrição levaria a inconsistências físicas. É sabido que uma partícula carregada como um elétron emite radiação (luz) ao executar um movimento acelerado como no caso de trajetórias ao redor de um núcleo. Deste modo, um modelo atômico baseado na física clássica levaria à conclusão de que os elétrons num átomo deveriam perder energia continuamente ao emitirem luz. Lá pelas tantas, devido a estas perdas, os elétrons cairiam no núcleo e os átomos não existiriam. Para resolver a situação, a mecânica quântica abandona a idéia de trajetória. Unicamente, se objetiva descobrir qual é a probabilidade de, num dado instante, um elétron no átomo estar numa certa posição com uma certa velocidade. Neste contexto, a física quântica ressuscita a noção de potencialidades conforme expressa por Aristóteles e debatida por Heisenberg (Heisenberg, 1958).

Num sistema clássico, medir a posição e a velocidade de uma partícula perturba o estado do sistema, uma vez que sempre há uma interação entre o aparelho de medida (digamos, um sensor de movimento) e o sistema sob análise. Entretanto, em princípio seria possível estabelecer métodos para auferir esta perturbação, de modo que o estado original do sistema pudesse ser recuperado. Num sistema quântico, pelo contrário, o panorama genérico é aquele em que a medição induz perturbações in-

controláveis no sistema. Não haveria como separar observador e observado, a única realidade possível sendo o sistema como um todo. Não seria possível olhar um elétron ao redor do núcleo atômico com um microscópio... Qualquer fóton, ou partícula de luz, que incidisse sobre o elétron arruinaria a trajetória que este eventualmente tivesse de início, de forma incontrolável. Isto porque a energia cedida pelo fóton no choque com o elétron seria suficiente para modificar seriamente a trajetória deste, já que se trata de um objeto na escala microscópica.

Este exemplo da espionagem de elétrons com microscópios pode dar a falsa impressão de que as trajetórias existem, mas que são impossíveis de determinar na prática. Como vimos, entretanto, a situação é mais grave: havendo pura e simplesmente trajetórias, aparentemente a própria estrutura da matéria conforme se conhece seria inexplicável, com os elétrons caindo no núcleo atômico devido a uma contínua perda de energia por emissão de radiação. Existem outras situações, como na chamada experiência da fenda dupla ou em fenômenos de tunelamento, em que a insistência na verdade das trajetórias leva a contradições sérias com os dados experimentais. No mínimo, algo mais deve estar presente, além das trajetórias, se é que estas existem. O caráter ondulatório da matéria parece ser impossível de ser varrido para debaixo do tapete.

É oportuno fazermos uma comparação com Zenon e Parmênides nesta hora. Na física quântica, as trajetórias (o movimento) seriam apenas uma ilusão de nossos sentidos. A descrição que fazemos em torno dos conceitos de velocidade e posição seria fruto da limitação de nossa linguagem, que é baseada na física clássica. Esta é a visão especialmente advogada por Bohr (Bohr, 1958). A conclusão pelo caráter ilusório das trajetórias, entretanto, tem origens quânticas bem diferentes daquelas cogitadas por Zenon, como vimos.

Do ponto de vista pragmático, todos sabem como proceder para “extrair os números” da teoria quântica, para explicar fenômenos da natureza ou propor novas tecnologias. Por outro lado, não existe consenso sobre seu conteúdo epistemológico. A interpretação canônica, a da escola de Copenhague, se baseia em dois aspectos, pode-se dizer. Um deles, determinístico, considera a evolução causal da função de onda segundo a chamada equação de Schrödinger. De um dado estado inicial caracterizado por uma certa função de onda, obtém-se um (único) estado final, sem margem para acaso ou probabilidades.

O segundo elemento principal a considerar de acordo com a escola de Copenhague lida com a teoria da medida. A função de onda, de modo geral, é uma superposição de estados admissíveis. Algo como se fosse razoável considerar uma pessoa que, simultaneamente, caminha para a esquerda e para a direita, ou que fosse uma sobreposição de dois estados, um correspon-



dendo a ir para a esquerda, outro para a direita. Macroscopicamente, é pouco provável nos depararmos com situações deste tipo, apesar de que fenômenos quânticos para sistemas “grandes” já tenham sido obtidos, como na chamada condensação de Bose-Einstein. No mais das vezes, é no mundo microscópico que as superposições de estados têm um papel incontornável. Entretanto, no momento de ser feita uma medição, o sistema assume um dos estados admissíveis, cada um deles com uma certa probabilidade fornecida pela função de onda original. Aparentemente, é aqui que Deus jogaria seus dados. Muito se tem debatido a respeito do problema da medida, sem se chegar a uma conclusão. Segundo a interpretação padrão, da escola de Copenhague, o que acontece é que a função de onda “colapsa” em um dos estados que compunham a sobreposição original. A partir deste instante, o sistema evoluiria novamente de modo causal e determinista. Esquemáticamente, um exemplo seria dado pela transição

$$\frac{1}{\sqrt{2}} ( \text{esquerda} \quad \text{direita} ) \quad \text{direita} , \quad (4)$$

onde a flecha representa o processo de medição. O fator numérico não deve tirar o sono do leitor, tendo sido colocado ali apenas por uma questão de consistência no âmbito da teoria quântica. Em caso de dúvida, sugiro esquecê-lo. Além disso, a transição foi de uma superposição “direita” mais “esquerda” para um estado onde apenas “direita” sobreviveu. Este seria um exemplo de colapso da função de onda. Diga-se de passagem, parece que no mundo macroscópico é mais comum mesmo sobrar só “direita”, ou mesmo transformações mais radicais onde “esquerda” se transmuda miraculosamente em “direita” sob as barbas de todos. Na física quântica, é um consolo saber que isto não é permitido: para uma medida resultar no estado “direita” ao menos um pouquinho de direita precisava estar presente na superposição original.

Muito se pode perguntar sobre o que se está chamando de colapso da função de onda. Acontece de modo instantâneo? Como é a interação entre o aparelho de medida e o sistema observado? Qual é o papel da consciência humana no processo? Dois séculos de ciência onde se admitiu a separação entre mente e matéria devem ser postos por terra? Estas questões e muitas outras semelhantes têm sido debatidas há décadas. O resultado é um sem-número de propostas alternativas à da escola de Copenhague, conforme pode ser visto, por exemplo, em Jammer (1974). No presente artigo, iremos nos limitar unicamente a uma destas interpretações alternativas, devida à de de Broglie (de Broglie, 1927) e aperfeiçoada por Bohm (Bohm, 1952).

De acordo com a interpretação de de Broglie-Bohm, os sistemas quânticos são na verdade simultaneamente partículas e ondas. Para comparação, a interpretação de Copenhagen supõe que os sistemas quânticos mostram apenas lados complementares da mesma moeda. Ou seja, de acordo com o aparato experimental, o sistema observado evidencia características de onda ou de partícula, mas jamais tudo ao mesmo tempo.

Uma experiência que serve para ilustrar esta dualidade onda-partícula é a experiência da fenda dupla, na qual um feixe de elétrons é direcionado a uma parede contendo duas fendas estreitas, A e B. Do lado oposto, está um anteparo que registra o impacto dos elétrons que passam pelo obstáculo. Se os elétrons fossem partículas clássicas, newtonianas, bolas de bilhar extremamente diminutas por assim dizer, haveria duas possibilidades. A saber, ou um dado elétron passa pela fenda A, ou pela fenda B (sem contar os elétrons que são refletidos sem chegar a ultrapassar nenhuma das fendas). Entretanto, quando se estuda a distribuição do impacto dos elétrons no anteparo, se encontra um padrão de interferência, típico de ondas. Além disso, parece que qualquer tentativa de descobrir qual das fendas foi escolhida por um dado elétron (descobrir qual teria sido a trajetória) acaba por destruir o padrão de interferência. Em outras palavras, ao se buscar o caráter de partícula do elétron, se perde o caráter ondulatório.

Um caso familiar de interferência entre ondas é dado pela interferência de um sinal de televisão ou de rádio com alguma outra onda eletromagnética, produzindo distorção na imagem ou no som. Outro caso seria aquele de ondas num fluido qualquer, como numa piscina. O que é curioso é que na experiência da fenda dupla com elétrons se está utilizando partículas pretensamente materiais.

Na interpretação de de Broglie-Bohm, cada elétron escolheria uma das fendas, sendo sua trajetória ditada (de acordo com uma certa receita matemática) pela função de onda. Além disso, o elétron não seria apenas uma partícula, mas também uma onda, ao mesmo tempo. É a onda que ultrapassaria as duas fendas, daí sendo produzido o padrão de interferência no anteparo. Desta maneira, seria desnecessário falar em colapso da função de onda, uma vez que as trajetórias existiriam. O que haveria de diferente é que as trajetórias não seriam dedutíveis das equações de Newton da física clássica, e sim da função de onda. A realidade física da função de onda não estaria em questão.

Do nosso ponto de vista, o que mais chama a atenção é que temos em mãos um fenômeno que pode ser decisivo no julgamento do conteúdo físico da função de onda. Esta seria uma mera ferramenta matemática, segundo a maioria dos livros-texto sobre mecânica quântica e segundo a interpretação de Copenhagen. Tal é uma das mensagens da teoria do colapso da fun-

ção de onda. Operacionalmente, as contas dão resultados corretos ao se adotar esta imagem. O problema é que um colapso da função de onda parece ser algo muito difícil de engolir.

Numa abordagem estritamente positivista, para a qual o que importa é reproduzir os resultados experimentais, pouco importa se a função de onda e seu colapso têm alguma realidade física. Entretanto, é desagradável ceder tão facilmente ao pragmatismo. Só mesmo caso não haja escapatória...

Convém observar que existem várias outras propostas, além da teoria de de Broglie-Bohm, que não levam em conta o colapso da função de onda. Entre estas, temos a interpretação dos muitos mundos ou a interpretação em termos do fenômeno da descoerência. Mais sobre o assunto pode ser lido, por exemplo, em Jammer (1974).

#### 4 Paradoxo de Zenon quântico

O argumento do paradoxo de Zenon quântico remonta a Schrödinger (Schrödinger, 1935), mas foi levado às últimas consequências apenas mais recentemente (Misra, 1977). Basicamente, a idéia do paradoxo de Zenon quântico é que um sistema instável, se for observado continuamente, não decai jamais! A demonstração matemática deste efeito não é tão complicada mas está além do escopo deste trabalho.

Talvez seja útil explicar algo a propósito destas expressões, sistemas instáveis e decaimento. Um exemplo é fornecido por um núcleo radioativo. A radioatividade é o fenômeno pelo qual um núcleo atômico emite uma partícula, como uma partícula alfa ou uma partícula beta, ou uma radiação eletromagnética (luz), na tentativa de obter uma configuração mais estável. A origem da radioatividade está no fato do núcleo atômico ser composto basicamente por partículas sem carga elétrica, os nêutrons, e partículas de carga positiva, os prótons. Como sabemos, cargas de mesmo sinal se repelem, de maneira que deve haver uma força adicional para manter a coesão do núcleo. Esta força é a chamada força nuclear forte, que atua apenas numa distância muito diminuta, da ordem do tamanho do núcleo. Nessas distâncias extremamente pequenas, a força nuclear forte (atrativa) suplanta em muito a força elétrica entre os prótons (repulsiva), garantindo que o núcleo não se desfaça. Entretanto, em certos elementos químicos, como o urânio e o plutônio, a força nuclear forte não consegue domar completamente os constituintes do núcleo, de modo que este é instável. Tais núcleos radioativos emitem partículas alfa ou beta, ou ainda radiação eletromagnética, de modo a obter uma conformação menos instável. O processo continua até que, eventualmente, todos os núcleos radioativos de uma amostra se convertam em núcleos estáveis, não radioativos. Vale observar que a emissão radioativa é um fenômeno quântico,

probabilístico: não se sabe em que instante o núcleo irá decair. O máximo que se tem à disposição são as probabilidades do decaimento.

Outra das forças fundamentais conhecidas na natureza é a força nuclear fraca, a qual tem um papel relevante no decaimento por emissão de radiação beta, mas esta já é outra história.

A palavra decaimento não aparece apenas na radioatividade (um fenômeno nuclear). Sempre que um sistema quântico passa de um estado de uma certa energia para um estado de energia menor se diz que houve um decaimento. Isto é o que acontece na emissão de luz por um átomo, por exemplo. Eventualmente, um átomo pode ter absorvido uma certa energia do meio externo, colocando-se, portanto, num estado de maior energia. Diz-se que o átomo está num estado “excitado”. De modo geral, a natureza escolhe com maior probabilidade os estados de menor energia. É por isto que as melancias se arrumam conforme o andar da carruagem. Seria improvável que, espontaneamente, as melancias se equilibrassem umas por cima das outras, tal qual num espetáculo circense, à medida que a carruagem fosse se movendo. No mundo atômico, também é verdade este princípio de que as menores energias são as mais favorecidas. Desta maneira, um átomo num estado excitado cedo ou tarde decairá para um estado de energia menor, graças à emissão de luz. Segundo a física quântica, não se sabe quando ou como se dará o decaimento, apenas as probabilidades do acontecimento.

Pois bem, o paradoxo de Zenon quântico nos diz que se um sistema instável for observado continuamente, ele não decairá. Em inglês, tem sido chamado de “watch-dog effect”, expressão de difícil tradução. Quem tem cães de estimação, porém, sabe do que se trata. Um olhar fixo pode paralisar ou hipnotizar um cão, perplexo diante do interesse do dono. É curioso que na física atômica um tal efeito possa ter lugar. Como se sabe, cães são sistemas instáveis.

Lamentavelmente, a demonstração matemática do paradoxo de Zenon quântico demandaria recursos além dos limites do presente trabalho. Também não dispomos de muitas analogias de fácil assimilação, como aquelas usadas por Zenon, envolvendo flechas, tartarugas ou maratonistas. Aqui o leitor volta e meia será forçado a um ato de fé e acreditar, pura e simplesmente.

Como a observação contínua de um decaimento radioativo aparentemente pode ser aproximadamente verificada ao seguir o traço de uma partícula alfa em laboratório, estamos diante de um paradoxo. Este resultado tão estranho logicamente traz dúvidas sobre sua validade. Correntemente, o paradoxo de Zenon quântico tem sido objeto de escrutínio tanto do ponto de vista da física teórica quanto da física experimental. Existem dúvidas sobre o que poderia ser uma observação contínua no tempo ou so-

bre como realizá-la de modo exato e não aproximado. O que já se verificou em laboratório (Itano, 1990) é que a probabilidade de não decaimento de certos sistemas instáveis se aproxima de 100% à medida que estes sistemas são monitorados a uma taxa cada vez maior. Na prática, parece inconcebível a verificação exata do paradoxo, já que não parece haver como monitorar um sistema a uma taxa infinita.

Certos autores (Mitra, 2006) associam o paradoxo de Zenon quântico à adoção da interpretação de Copenhagen. Mais exatamente, o paradoxo de Zenon quântico surgiria devido à aceitação incondicional do colapso da função de onda. Rejeitado o colapso da função de onda, como na interpretação de de Broglie-Bohm ou em outras, não nos veríamos às voltas com o paradoxo. Neste sentido, a concretização de experiências engenhosas sobre o decaimento de sistemas quânticos pode ajudar na resolução do problema da medida. Estas e muitas outras particularidades podem ser melhor exploradas na referência (Mitra, 2006), incluindo o chamado anti-paradoxo de Zenon quântico. Neste anti-paradoxo, um certo gênero de observações (medições) contínuas de um sistema quântico instável termina por acelerar o decaimento. Isto é o oposto dos processos de medida no paradoxo de Zenon quântico, onde a medição inibe o decaimento.

Outra experiência que ilustra bem a interação entre observador e observado na física quântica é dada pela experiência do gato de Schrödinger, conforme segue.

Schrödinger tem um gato. Resolve então colocá-lo dentro de uma caixa, contendo um núcleo de um elemento radioativo, um contador Geiger e um recipiente, dentro do qual há um gás letal. Se o núcleo decair antes de um certo intervalo de tempo, o contador Geiger registra o ocorrido e um sistema eletrônico ordena que o recipiente com o gás venenoso seja quebrado. Ou seja, se o núcleo decair rapidamente, o gato morre. Entretanto, como o núcleo em geral existe como uma superposição dos estados “decaído” e “não decaído”, o gato, que é um sistema macroscópico, teoricamente existe como uma mistura de “gato morto” e “gato vivo”. Se não for feita a medição, a observação através do contador Geiger, supõe-se que o estado do gato seja mesmo esta mistura. A observação seleciona um dos estados mutuamente excludentes de acordo com a física clássica.

Conclui-se então que um gato de Schrödinger-Zenon sobreviveria, uma vez que o monitoramento contínuo do núcleo radioativo inibe o seu decaimento.

## 5 Conclusão

De certo modo, o paradoxo de Zenon quântico é remanescente das indagações de Zenon e Parmênides a respeito da na-

tureza objetiva do mundo. De acordo com o exposto na seção 2, descontando uma eventual granularidade do espaço e do tempo, foi possível resolver o paradoxo clássico utilizando técnicas matemáticas que não estavam à disposição na época dos filósofos gregos. Já o paradoxo de Zenon quântico pode até fornecer um dos raros crivos para descartarmos algumas das interpretações da teoria quântica atualmente em voga. Seria realmente memorável se conseguíssemos levar a cabo experiências conclusivas neste sentido. No caso do paradoxo de Zenon clássico, foi a matemática quem deu a chave para sua resolução. No caso do paradoxo de Zenon quântico, é a experiência física quem pode nos ajudar. Como de hábito, filosofia, matemática e física andam lado a lado, cada uma delas influenciando as outras.

## Referências

BOHR, N. H. D. *Atomic Physics and Human Knowledge*. New York: John Wiley & Sons, 1958.

DINONÍSIO, P. H. Física Quântica: da sua Pré-História à Discussão sobre seu Conteúdo Essencial, Unisinos, *Cadernos do Instituto Humanitas – Idéias*, n. 22, 2004.

HAAS, F. Computação Quântica – Desafios para o Século XXI. Unisinos, *Cadernos do Instituto Humanitas – Idéias*, n. 53, 2006.

HEISENBERG, W. *Physics and Philosophy: the Revolution in Modern Science*. New York: Harper and Row, 1958.

ITANO, W. M.; HEINZEN, D. J.; BOLLINGER, J. J. and WINELAND, D. J. Quantum Zeno Effect. *Phys. Rev. A*, v. 41, n. 5, p. 2295-2300, march 1990.

JAMMER, M. *The Philosophy of Quantum Mechanics: the Interpretations in Quantum Mechanics in Historical Perspective*. New York: John Wiley & Sons, 1974.

MISRA, B. and SUDARSHAN, E. C. G. The Zeno's Paradox in Quantum Theory. *J. Math. Phys.* v. 18, n. 4, p. 756-763, April 1977.

MITRA, A. N. *On the Foundations of Quantum Theory*. *ArXiv: quant-ph/0510223*, v. 1, 28 October 2005. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/quant-ph/0510223>>. Acesso em: 11 de julho de 2006.

OLIVEIRA, A. L. Natureza e Liberdade – a Física Atual em Foco. Unisinos, *Cadernos do Instituto Humanitas – em Formação*. Ano 2, n. 6, p. 57, 2006.

SAINSBURY, R. M. *Paradoxes*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

SCHÄFER, L. A Realidade Quântica como Base da Visão de Teilhard de Chardin e uma Nova Concepção da Evolução Biológica. Unisinos, *Cadernos do Instituto Humanitas – Idéias*, n. 45, 2005.

SCHRÖDINGER, E. *Die neuere Lage in der Quantenmechanik*. *Naturwissenschaften*, v. 23, n. 5, p. 812-825, jun. 1935.



**Fernando Haas** (1970) é natural de Porto Alegre/RS. É professor adjunto na Unisinos desde 2003. É bacharel (1991) e mestre em Física (1994) pelo Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, instituição onde também concluiu o Doutorado em Ciências (1998), com a tese *Sistemas de Ermakov Generalizados, Simetrias e Invariantes Exatos*. Em 2000, obteve o Pós-Doutorado na área de Física de Plasma pelo Laboratoire de Physique des Milieux Ionisés et Applications, Université Henri Poincaré, Nancy, França.

#### **Algumas publicações do autor**

HAAS, F. Harris sheet solution for magnetized quantum plasmas, *Europhysics Letters*, 77, 45004, 2007.

HAAS, F. A magnetohydrodynamic model for quantum plasmas, *Physics Of Plasmas*, 12, 06211, 2005.

HAAS, F.; GARCIA, L.; GOEDERT, J. e MANFREDI, G. Quantum ion-acoustic waves, *Physics Of Plasmas*, 10, 3858, 2003.

HAAS, F. Anisotropic Bose-Einstein condensates and completely integrable dynamical systems, *Physical Review A.*, 65, 33603, 2002.

HAAS, F.; MANFREDI, G. e FEIX, M. Multistream model for quantum plasmas, *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids And Related Interdisciplinary Topics*, 62, 2763, 2000.