

COMPLEMENTARIDADE DE ARRANJOS EXPERIMENTAIS

1. “Fenômeno” Corpuscular

Examinando o efeito fotoelétrico, é possível concluir que nunca se detectam “meio fótons”. Esta conclusão pode também ser obtida por meio de um experimento de “anticorrelação”. Primeiro prepara-se um estado monofotônico de energia $h\nu_0$ (Fig. II.4), e lança-se este fóton contra um espelho semirrefletor S_1 . Dois detectores D_1 e D_2 sensíveis a um largo espectro de energia (incluindo $h\nu_0/2$, para a eventualidade de se detectar meio fóton) são inseridos em cada um dos caminhos possíveis (Fig. III.1). Observa-se então que sempre que o fóton é detectado em D_1 , nada é detectado em D_2 (e vice-versa). Isso indica de maneira direta que o quantum de luz não se divide em duas partes que possam ser simultaneamente detectadas.

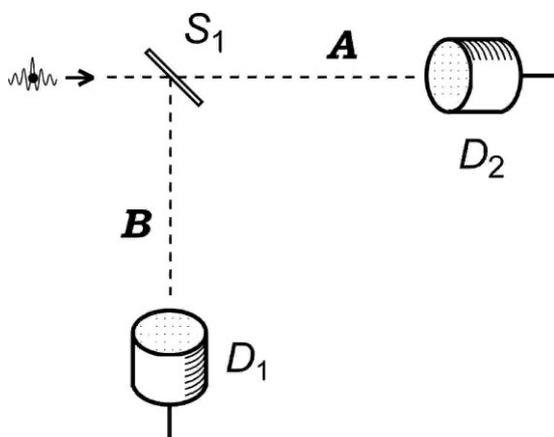


Figura III.1. Experimento de anticorrelação, realizado por Grangier et al. (nota 19).

Na verdade, às vezes ocorrem contagens em coincidência (dentro de uma janela de 1 segundo, por exemplo), mas isso é devido à presença ocasional de dois fótons no pacote de onda incidente. Tal coincidência ocorre em taxas bastante baixas.²¹ Também este experimento foi realizado por Grangier, Roger & Aspect, em 1986. A dificuldade em realizá-lo se deve à preparação do estado monofotônico (que vimos na seção II.3).

O experimento visto acima é um exemplo do que Niels Bohr chamava de “fenômeno” corpuscular. Podemos aspas na palavra *fenômeno* porque para Bohr ela tinha um significado diferente do usual em Filosofia. Normalmente, fenômeno designa qualquer coisa que aparece para a nossa percepção. Para Bohr, a partir de 1935, ele designa a “totalidade” que inclui o objeto quântico e a aparelhagem experimental. Além disso, um “fenômeno” só se completa quando o experimento termina, quando um resultado experimental é registrado em nível macroscópico.

²¹ Na prática, o problema é comparar as taxas de contagem p_1 e p_2 nos detectores com a taxa de detecção em coincidência p_{12} . Se as coincidências fossem acidentais, $p_{12} = p_1 + p_2$ (luz de laser, caso “poissoniano”). No caso ondulatório clássico, $p_{12} > p_1 + p_2$ (luz caótica, com efeitos de “condensação”). Neste experimento de anticorrelação, verifica-se que $p_{12} < p_1 + p_2$, ou seja, a detecção de um fóton em um detector diminui as chances de medir outro no outro detector.

Agora, por que o “fenômeno” descrito acima é corpuscular? Não é porque o fóton é detectado como uma quantidade discreta e bem localizada de energia, pois isto ocorre também em fenômenos ondulatórios. O fenômeno é chamado “corpuscular” porque, após detectarmos um fóton, podemos dizer com segurança qual *trajetória* ele seguiu.

Vejamus uma outra versão do experimento acima, obtido a partir do interferômetro de Mach-Zehnder. Considere a aparelhagem representada na Fig. II.3, mas com o espelho semirrefletor S_2 retirado. O arranjo resultante (Fig. III.2) é quase idêntico ao que vimos acima. Se registramos um “clique” em D_1 , podemos inferir que o fóton veio pelo caminho B ; se o “clique” for registrado em D_2 , a trajetória inferida é A . Eis um fenômeno corpuscular!

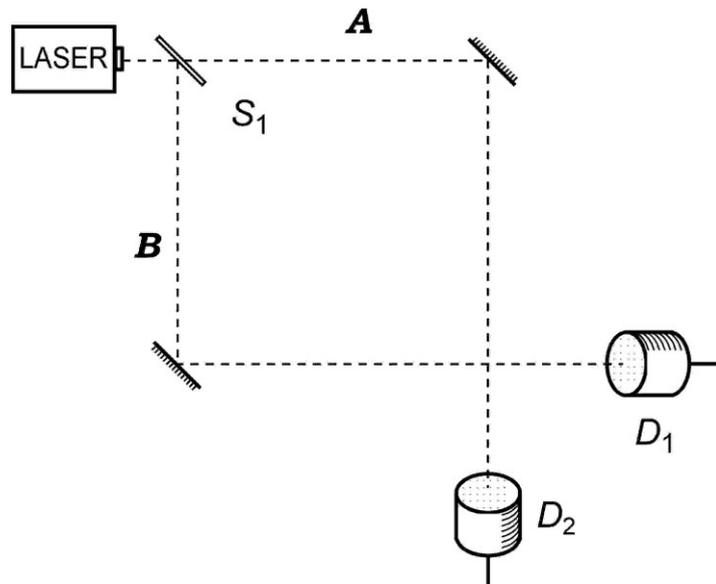


Figura III.2. Fenômeno corpuscular obtido a partir do interferômetro de Mach-Zehnder, retirando-se S_2 .

Vejamus como as diferentes interpretações analisam este experimento simples.

(1) *Interpretação Ondulatória.* Após atravessar S_1 , o pacote de onda associado ao fóton se divide em dois, o que pode ser expresso por uma função de onda do tipo $\psi_A + \psi_B$. Porém, ao detectar-se o fóton em D_1 , por exemplo, a probabilidade de detecção em D_2 torna-se nula instantaneamente! O estado inicial é reduzido, neste caso, para ψ_B . Como, nesta interpretação, o estado corresponde a uma onda de probabilidade “real”, conclui-se que ocorreu um processo de *colapso* do pacote de onda.

(2) *Interpretação Corpuscular.* Neste caso a explicação é direta: a partícula simplesmente seguiu uma das trajetórias possíveis, indo parar em D_1 ou D_2 . Não é preciso falar em “colapso”.

(3) *Interpretação Dualista Realista.* Esta visão também considera que, após S_1 , a partícula seguiu uma das trajetórias A ou B , incidindo então no detector correspondente. Mas existiria também uma onda associada, que se dividiu em duas partes. A parte não detectada constituiria uma “onda vazia” que não carrega energia e não pode ser detectada. Há quem critique esta proliferação de entidades (as ondas vazias), mas em experimentos simples isso não leva a nenhuma consequência observacional indesejável. Outra crítica é feita à noção de que a onda vazia não carrega energia, só informação; para contornar esta crítica, pode-se postular que a energia associada à onda vazia tem um valor muitíssimo menor do que aquela associada ao corpúsculo, da ordem por exemplo da energia de ponto zero do vácuo quântico.

(4) *Interpretação da Complementaridade.* Completada a medição, essa interpretação considera o fenômeno como sendo corpuscular. O fóton pode assim ser considerado uma partícula que seguiu uma trajetória bem definida. Tal inferência com relação à trajetória passada do quantum detectado é conhecida como “retrodição” (voltaremos a ela na seção X.7).

(5) *Interpretação Instrumentalista*. A descrição matemática do experimento pode ser feita na “representação de Schrödinger”, que a interpretação ondulatória considera ser a descrição real do sistema, ao passo que a visão instrumentalista considera como sendo apenas uma descrição *matemática* e nada mais. O importante nesta análise é a situação que ocorre quando o pacote de onda monofotônico atinge o semi-espelho S_2 (ver Fig. III.4c): se houver semi-espelho, há interferência e a notação matemática indica que o pacote ruma para D_1 (mas nada se diz sobre o que acontece na realidade). Se não houver o semi-espelho, como na Fig. III.2, haverá uma amplitude de probabilidade incidindo em cada detector (segundo a representação matemática, nada se falando sobre a realidade), e a probabilidade de detecção em cada medidor será $\frac{1}{2}$. Pode-se falar em “redução de estado” para descrever a alteração da representação de estado que se segue a uma medição (neste caso, o fóton é absorvido e desaparece, então não há propriamente uma “redução”), mas não faz sentido dizer que ocorre um colapso de uma onda-de-probabilidade real, como defende a interpretação ondulatória realista. Assim, o aspecto “não local” (praticamente instantâneo) do colapso da onda não é um problema para a visão instrumentalista, pois a alteração abrupta do estado quântico é algo que ocorre apenas no formalismo teórico, refletindo uma aquisição de conhecimento que se segue à medição.

2. Dualidade Onda-Partícula: versão forte

Um fenômeno é *corpuscular* quando podemos inferir, após completada a medição, qual foi a trajetória do quantum detectado. O fenômeno envolvendo o interferômetro de Mach-Zehnder para um único fóton (seções II.2 e 3) *não* é corpuscular, pois não se pode em princípio dizer, de um fóton detectado em D_1 , se seguiu pelo caminho A ou por B .

Um fenômeno *ondulatório* é aquele em que aparece um padrão de interferência, com a variação da fase relativa entre os caminhos. Já vimos um padrão espacial, no experimento da dupla fenda (Fig. I.1), e também um temporal, no interferômetro de Mach-Zehnder (Fig. II.7). Outro critério para se identificar um fenômeno ondulatório seria a existência de interferência destrutiva, como na Fig. II.3 (defronte de D_2), mas veremos mais para frente, com o interferômetro de Unruh, que este critério nem sempre é válido.

É um fato empírico notável que um experimento não pode ser ao mesmo tempo corpuscular e ondulatório. Eis então a versão que Bohr deu para a *dualidade onda-partícula*, que chamaremos de “versão forte” (ou “complementaridade de arranjos experimentais”):

Um sistema quântico ou exhibe aspectos corpusculares (podendo-se inferir trajetórias bem definidas no passado), ou aspectos ondulatórios (como a formação de um padrão de interferência), dependendo do arranjo experimental, mas nunca ambos ao mesmo tempo.

Essas não são as palavras de Bohr, mas exprimem a sua noção de que onda e partícula são aspectos mutuamente excludentes, mas *complementares*, da natureza. Ou seja, para representar um objeto quântico como um elétron, ou um fóton, podemos encará-lo ou como partícula, para certas situações experimentais, ou como onda, para outras situações. Segundo Bohr, é impossível montar um arranjo experimental que exhiba simultaneamente esses dois aspectos da natureza (por isso é que são *mutuamente excludentes*). Porém, só podemos compreender um objeto quântico de maneira completa, segundo ele, quando levamos em conta esses dois aspectos complementares.

Para Bohr, essa situação exprime uma limitação fundamental que existe em nossa linguagem, e em nossa capacidade de representar pictoricamente o mundo. Nossa linguagem é

adequada para descrever objetos macroscópicos, como um aparelho de medição, e serve para nos comunicarmos com outros humanos, por exemplo informando que obtivemos um determinado resultado experimental. Porém, através de nossa linguagem não conseguimos representar um objeto quântico em um “quadro único”: precisamos de descrições complementares (voltaremos a este assunto na seção XI.2).

Mas o “fenômeno” que chamamos ondulatório não envolve a detecção de fótons individuais, evidenciando a existência de corpúsculos indivisíveis? Sim, mas vimos (seção I.4) que, para Bohr, a detecção de fótons individuais é consequência da “indivisibilidade dos processos atômicos”, e não do princípio de complementaridade.

3. Experimento da Escolha Demorada

Ao estudarmos o interferômetro de Mach-Zehnder, vimos que a única diferença entre os fenômenos ondulatório e corpuscular que descrevemos (Figs. II.3 e III.2) é a presença ou não do espelho semirrefletor S_2 . Até que instante o cientista pode escolher entre deixar ou retirar S_2 , de forma a fazer o fenômeno ser ondulatório ou corpuscular? Pode ele esperar o fóton (pacote monofotônico) passar pelo primeiro espelho semirrefletor (S_1) para daí então escolher qual fenômeno vai acontecer? Sim! Tal escolha pode ser feita até o instante logo antes de o pacote de onda associado ao fóton chegar a S_2 .

Este *experimento de escolha demorada* usando o interferômetro de Mach-Zehnder foi estudado pelo físico estadunidense John Wheeler, a partir de 1978. Já em 1931, porém, o alemão Carl von Weizsäcker havia descrito um experimento deste tipo, usando a ideia do microscópio de raios gama de Werner Heisenberg.²²

Para examinarmos este experimento, consideremos alguns instantes temporais ao longo do percurso do fóton, na montagem da Fig. III.3. No instante t_1 , o fóton incide em S_1 ; em t_2 , ele se encontra dentro do interferômetro; em t_3 ele passa pela posição do espelho semirrefletor S_2 ; em t_4 ele se aproxima do detector; em t_5 ele gera um sinal macroscópico no osciloscópio.

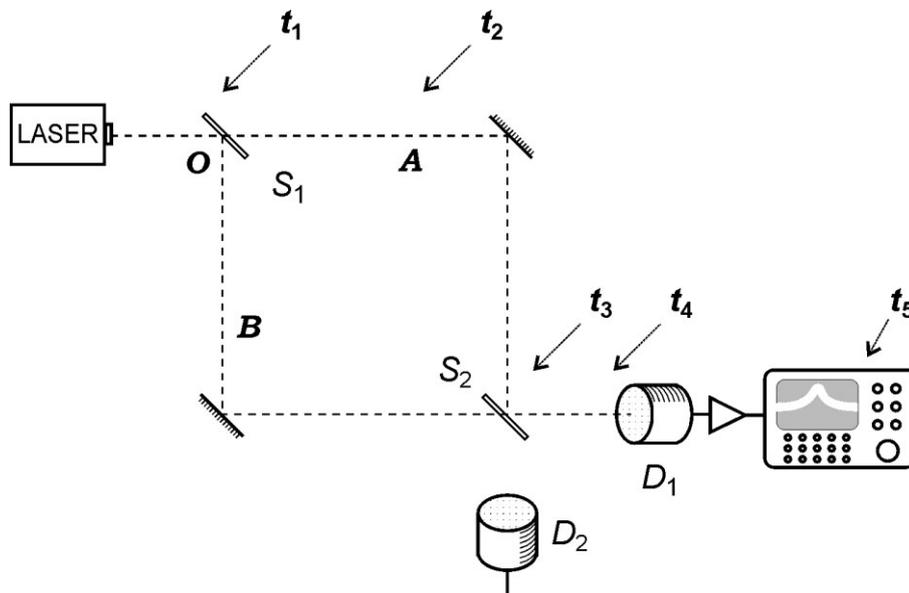


Figura III.3. Desenho do interferômetro, indicando-se diferentes instantes temporais. (Neste arranjo, nenhuma luz é detectada em D_2 , e o correspondente osciloscópio é ignorado.)

²² Ver *Conceitos de física quântica*, vol. 1, seção XII.5.

A Fig. III.4 representa a situação segundo a interpretação ondulatória realista. O que diz a interpretação da complementaridade no instante t_2 , quando o pacote monofotônico está dentro do interferômetro? Nada! Não se pode dizer nem que o fenômeno quântico é ondulatório, nem que ele é corpuscular. Só no instante t_3 , dependendo se o espelho S_2 estiver colocado ou não, é que ocorrerá interferência ou não. A rigor, só quando o fenômeno se completa, e um registro macroscópico é obtido no aparelho de medição, no instante t_5 , é que se pode dizer qual é o fenômeno (onda ou partícula), e que se pode dizer o que estava acontecendo no passado, no instante t_2 !

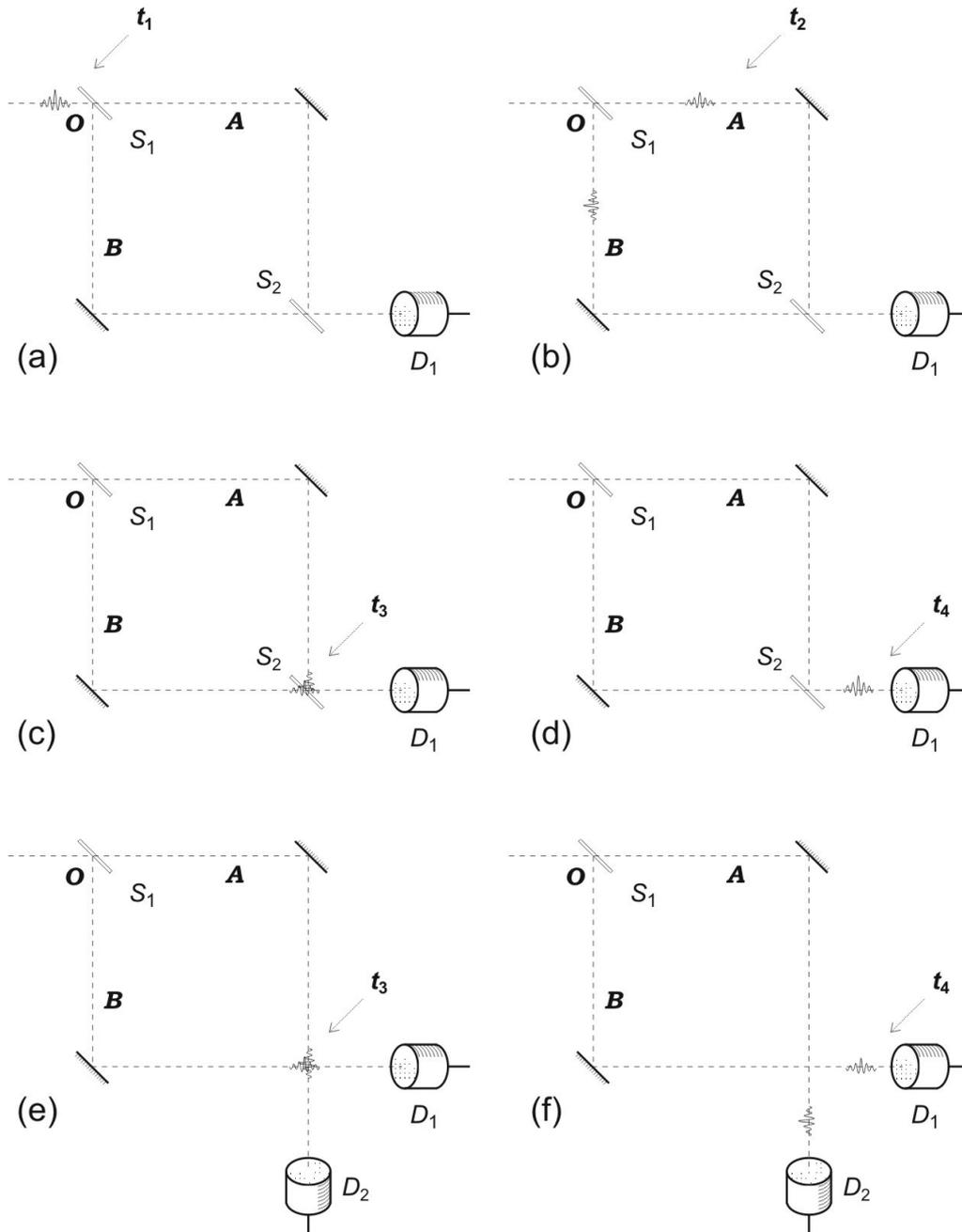


Figura III.4. Posição do pacote monofotônico, no experimento da escolha demorada. (a) Em t_1 , pacote se aproxima de S_1 . (b) Em t_2 , pacote divide-se nos caminhos A e B , segundo a interpretação ondulatória realista. (c) Em t_3 , com a presença de S_2 , as duas amplitudes de onda interferem. (d) Em t_4 , pacote rumo para o detector D_1 . (e) Sem a presença de S_2 , as duas amplitudes passam pela mesma região sem haver alteração de seu movimento. (f) As ondas de probabilidade se aproximam dos detectores.

Este experimento exemplifica bem a aplicação da interpretação da complementaridade. Só se pode falar algo sobre o objeto quântico após se obter um resultado experimental. Mesmo que em t_3 o espelho não esteja presente, o fenômeno (em t_4) ainda não se constituiu como corpuscular. Pois é possível que em t_4 alguém (um demônio veloz) coloque espelhos de forma a recombinar as componentes, resultando em um fenômeno ondulatório. Só com o registro macroscópico é que esta possibilidade pode ser excluída.

O experimento da escolha demorada no interferômetro de Mach-Zehnder foi realizado em torno de 1984 por dois grupos, Alley et al., na Universidade de Maryland, e Hellmuth et al., no Instituto Max Planck, perto de Munique.²³ A montagem experimental deste segundo grupo está representada na Fig. III.5. Nela, o segundo espelho semirrefletor permanece imóvel, e uma célula de Pockels é introduzida em um dos caminhos, seguida de um polarizador. Utilizando um pulso de laser polarizado, a célula de Pockels é capaz de girar em 90° a polarização linear do pulso.

Assim, quando este dispositivo de óptica não-linear é acionado por uma tensão elétrica (o que demora apenas 4 nanossegundos), o pulso de luz é girado e subsequentemente bloqueado pelo polarizador que se segue à célula. Ou seja, com a célula ligada, o caminho *A* é bloqueado, e temos um comportamento corpuscular; com a célula desligada, ocorre a interferência típica do comportamento ondulatório. No experimento em questão, fibras ópticas foram usadas para aumentar cada um dos caminhos, de forma que a escolha de se ligar ou não a célula de Pockels pôde ser feita 5 nanossegundos depois que o pulso passou pelo primeiro espelho semirrefletor.

Nesse mesmo trabalho, o grupo de Hellmuth et al. também realizou um interessante experimento de escolha demorada envolvendo “batimentos quânticos”.²⁴

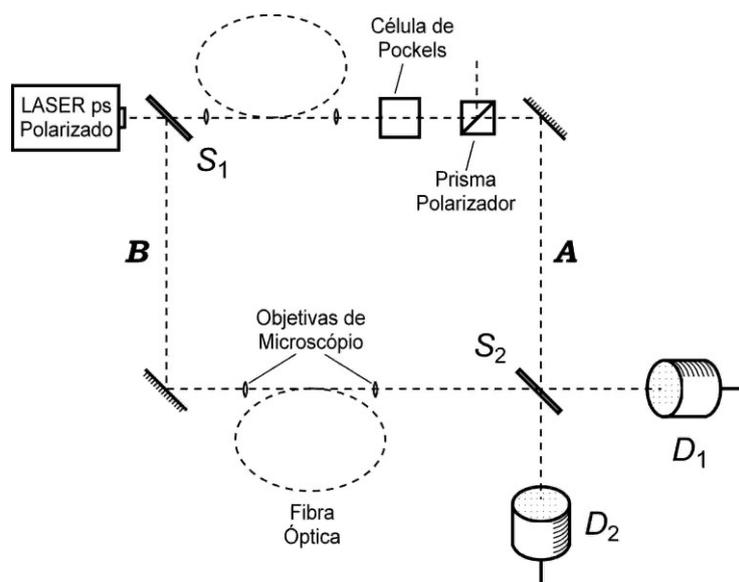


Figura III.5. Realização prática do experimento de escolha demorada, por Hellmuth et al. (1987).

²³ Resultados preliminares de ambos os trabalhos foram apresentados em uma conferência no Japão, em 1983. ALLEY, C.O.; JAKUBOWICZ, O.; STEGGERDA, C.A. & WICKES, W.C. (1984), “A delayed random choice quantum mechanics experiment with light quanta”, in *Proceedings of the International Symposium Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology*, Physical Society of Japan, Tokyo, pp. 158-64. O trabalho mais completo do grupo alemão é: HELLMUTH, T.; WALTHER, H.; ZAJONC, A. & SCHLEICH, W. (1987), “Delayed-choice experiments in quantum interference”, *Physical Review A* 35, 2532-41. Para uma discussão histórica deste episódio, ver BROMBERG, Joan L. (2008), “New instruments and the meaning of quantum mechanics”, *Historical Studies in the Natural Sciences* 38, 325-52.

²⁴ Ver *Conceitos de física quântica*, vol. 1, seção XIII.2.

4. Atualização do Passado no Presente

Na seção anterior, vimos como a interpretação da complementaridade descreve o experimento de escolha demorada, proibindo que se fale algo sobre o fenômeno no instante t_2 . Isto porém não ocorre com as interpretações realistas.

De acordo com a interpretação ondulatória, em t_2 o pacote de onda se divide entre duas posições (no caminho A e no B); o que ocorre no futuro (em t_3) em nada afeta a realidade em t_2 . O mesmo ocorre com a interpretação dualista realista. A Tabela III.1 resume como cada uma dessas três interpretações descreve esse experimento de escolha demorada.

No antirrealismo sóbrio de Bohr, os atributos “onda” e “corpúsculo” referem-se a quadros clássicos que utilizamos para representar um fenômeno experimental, e não a alguma espécie de realidade (trata-se de uma visão “epistêmica”). Ao explorar o experimento de escolha demorada, porém, Wheeler injetou uma dose de realismo na interpretação da complementaridade, pois passou a considerar que “onda” ou “corpúsculo” descrevem diretamente diferentes realidades (uma visão mais “ontológica”). Ao fazer isso, Wheeler chegou a uma conclusão que chamou a atenção da imprensa de divulgação científica mundial: apenas quando o “observador participante” decide se o fenômeno será corpuscular ou ondulatório é que a realidade passada adquire uma existência “atualizada”; 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.”²⁵

Que estranho! Segundo esta versão mais realista da interpretação da complementaridade, no mundo da Física Quântica, pode acontecer de *o passado se atualizar apenas no presente!* Numa variação desta versão realista da complementaridade, afirma-se que o fóton “pode dizer de antemão” se o espelho S_2 estará posicionado ou não, ou que ele “sabe como deve se comportar” antes de mesmo de entrar no interferômetro.²⁶

Encontramos com isso uma “anomalia” conceitual da interpretação da complementaridade: às vezes ela se cala sobre o presente (em t_2 , por exemplo), para posteriormente (em t_3) se referir ao passado (em t_2) de maneira definida. Na versão de Wheeler, a anomalia é ainda mais radical: o passado pode passar a existir apenas no presente. Essas propriedades estranhas não surgem nas interpretações realistas, conforme já vimos. As anomalias destas visões são de outra ordem. A interpretação ondulatória necessita de colapsos não-locais; a dualista realista introduz ondas vazias; e a interpretação corpuscular só consegue explicar fenômenos ondulatórios através de estranhos mecanismos ou apelando para uma lógica não-clássica.

Já a interpretação instrumentalista compartilha da atitude bohriana de só falar da realidade do que é medido, associando ao experimento uma descrição matemática (exprimindo as situações apresentadas na Fig. III.4 de maneira formal), mas tal descrição é apenas isso: uma representação teórica. Não há também preocupação sobre se o fenômeno é ondulatório ou corpuscular, pois o formalismo por si só já dá conta de fornecer as frequências relativas esperadas em cada detector.

²⁵ WHEELER (1983), op. cit. (nota 15), p. 194. O artigo original e mais extenso é: WHEELER, J.A. (1978), “The ‘past’ and the ‘delayed-choice’ double-slit experiment”, in Marlow, A.R. (org.), *Mathematical foundations of quantum theory*, Academic, New York, pp. 9-48.

²⁶ HAWKES, N. (1995), “Need a light on the subject?”, *The Times*, London, 13 de março, p. 16. O texto deste jornalista aparece traduzido no livro *Conceitos de física quântica*, vol. 1, 2003, p. 177.

	COMPLEMENTARIDADE		DUALISMO REALISTA		ONDULATÓRIA	
t_1	Fóton está em O .		Partícula e pacote da onda piloto estão em O .		Pacote de onda está em O .	
t_2	----- (nada pode-se dizer)		Onda piloto se divide em duas, e partícula segue por um caminho, A ou B .		Pacote de onda se divide em dois componentes, A e B .	
t_3	Escolhemos <u>pôr</u> ou <u>retirar</u> S_2 . ↓ ↓		Escolhemos <u>pôr</u> ou <u>retirar</u> S_2 . ↓ ↓		Escolhemos <u>pôr</u> ou <u>retirar</u> S_2 . ↓ ↓	
t_5	FENÔMENO ONDULAT. Detecção em D_1 .	FENÔMENO CORPUSC. Detecção em D_1 ou D_2 .	Detecção da partícula em D_1 .	Detecção da partícula em D_1 ou D_2 , com onda vazia no outro.	Detecção em D_1 .	Detecção em D_1 ou D_2 , com colapso não-local no outro.
t_5	Podemos considerar que em t_2 havia uma onda.	Podemos considerar que em t_2 havia uma partícula em B ou A .	Passado não muda!	Passado não muda!	Passado não muda!	Passado não muda!

Tabela III.1. O experimento de escolha demorada segundo diferentes interpretações. Para simplificar, a situação em t_4 foi omitida.