

Notas de Aula do mini-curso Fundamentos da Mecânica Quântica do
Seminário dos Alunos de Pós-graduação do Dep. de Física UFJF 2013
Bernhard Lesche

1.1 Sistemas físicos, observáveis e estados.

Muitos dos fenômenos quânticos podem ser explicados com a teoria ondulatória da matéria de Schrödinger e de Broglie. Mas, certos comportamentos aleatórios de sistemas microscópicos não são bem explicados por esta teoria. A Mecânica Quântica, com a formulação de Copenhague (København) descreve as experiências corretamente, mas ela deixa muitos físicos insatisfeitos, com a sensação de ter usado uma teoria que não pode ser compreendida. De fato praticamente todos os livros texto da Mecânica Quântica falam de *POSTULADOS da Mecânica Quântica*. Segundo o dicionário Aurélio um postulado é um axioma não intuitivo. Os postulados da Mecânica Quântica permitem uma abordagem rápida, mas eles dificultam a compreensão da teoria. Para chegarmos numa compreensão da Teoria Quântica devemos começar com uma análise crítica de todo procedimento de pesquisa física.

Experimentos físicos estudam geralmente objetos que separamos física ou mentalmente do resto do universo. Classificamos estes objetos com critérios de classificação que selecionam objetos com comportamentos semelhantes e que permitem fazer certos tipos de medida experimental. Chamamos as classes de *sistemas físicos*. Por exemplo, podemos estudar um sistema físico que consiste de um elétron, ou um que consiste de dois elétrons ou um que consiste de um próton etc. . Um procedimento científico requer naturalmente uma definição mais exata do conceito de sistema físico. Devemos especificar o que queremos dizer com “um elétron”. O que define um dado sistema físico são duas coisas: 1) o conjunto de grandezas que podemos observar ou medir com tal sistema e 2) certas relações entre as grandezas observáveis. Por exemplo, num elétron podemos medir posição, podemos medir velocidade, momento linear, momento angular, momento magnético etc. . Diferentemente, num sistema de dois elétrons temos dois observáveis de posição e isto diferencia este sistema do primeiro. Se olharmos para o sistema que consiste de um próton, percebemos que os observáveis são os mesmos do sistema que consiste de um elétron, mas existem relações entre estes observáveis que diferenciam um sistema do outro: a relação entre velocidade e momento linear ou a relação entre momento magnético e momento angular são diferentes para estes sistemas. A definição completa destes sistemas requer naturalmente definições dos observáveis posição, momento etc. . Daremos estas definições somente bem mais tarde.

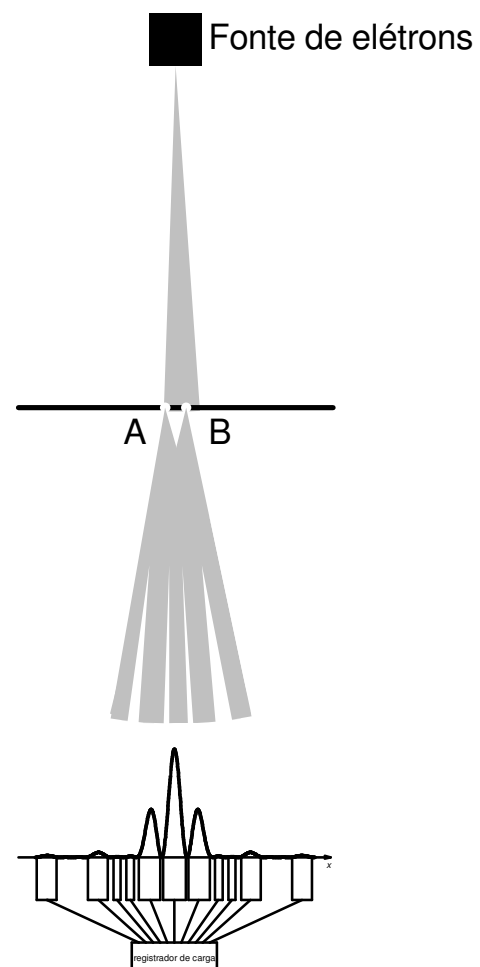
Um sistema físico é uma classe de objetos e não apenas um objeto por que um dado sistema pode estar em diversos estados diferentes. O que determina o estado de um sistema é o procedimento experimental que fornece o sistema e com isto prepara o estado. Existem procedimentos de preparação que fixam o estado apenas de forma grosseira e outros que determinam o estado bastante nitidamente. No caso de um procedimento experimental que determina o estado idealmente bem falamos de um estado puro. No caso contrário chamamos o estado de misto. Mais tarde daremos uma definição mais formal da pureza do estado. Por enquanto basta uma idéia heurística deste conceito. Podemos encarar um estado misto como um que descreve um sistema num estado puro não bem conhecido.

Voltaremos agora um pouco para os observáveis. Naturalmente um determinado observável faz sentido somente para determinados objetos. Por exemplo, não faz

nenhum sentido de falar *da posição do campo elétrico* ou da *distância de um ponto*. Isto é tão óbvio que normalmente nem se fala para que objetos um determinado observável é aplicável. Mas as coisas muito óbvias nem sempre são totalmente triviais e “inofensivas”. Na questão, para que objeto um determinado observável faz sentido, reside justamente o ponto central que diferencia a física clássica da física quântica. Na física clássica supõem-se que todos os observáveis que podem ser medidos num sistema fazem sentido para este sistema, independente do estado do sistema. Na verdade nada impede que o mundo real não seja tão simples. É perfeitamente aceitável que o conjunto de observáveis que fazem sentido dependa do estado do sistema. Nos sistemas quânticos isto é o caso. No entanto, o que é curioso nos sistemas quânticos, é que todos os observáveis que podem ser medidos no sistema podem sempre ser medidos neste sistema, independente do estado. Mas nem todos podem ser considerados atributos do sistema no dado estado. Como pode ser isto? Posso medir um observável \hat{A} com um sistema num dado estado ϵ e encontro um valor a , mas este valor não pode ser considerado uma propriedade do sistema neste estado ϵ porque quando repito a experiência com exatamente o mesmo estado mantendo todas as circunstâncias que julgo relevantes iguais encontro algum outro valor a' . A explicação deste comportamento errático do sistema é simplesmente que fiz a ele uma pergunta inapropriada. Perguntei experimentalmente por uma grandeza \hat{A} que para o sistema no estado ϵ não faz sentido. Então não é de se estranhar que o sistema responda de forma errática frente a uma pergunta errada.

Claro que podemos encontrar respostas flutuantes também com sistemas clássicos. Mas isto devido a uma preparação insuficiente do estado, ou seja, com estados mistos. As flutuações quânticas são de outra natureza. Para ver a diferença entre flutuações provocadas por uma pergunta quântica inapropriada e flutuações provocadas por preparação insuficiente do estado analisaremos aqui a experiência de interferências de elétrons feita por Düker e Möllenstedt. Podemos encarar esta experiência como uma experiência de Young para partículas. Imagine então que temos um aparato de preparação que sob nosso comando expele um elétron de um pequeno orifício. O elétron sai com certa velocidade e podemos associar a ele um comprimento de onda de de Broglie. Longe deste aparato de preparação colocamos (tudo dentro de uma câmara de vácuo) um anteparo com dois furinhos próximos. Com os conhecimentos da mecânica ondulatória calculamos um padrão de interferência da onda de matéria que se forma atrás do anteparo.

Fig. 1.01.1 Experiência de Young com elétrons.



A figura 1.01.1 mostra a experiência esquematicamente. A figura 3.01.2 mostra um gráfico da intensidade de onda calculada

com a mecânica ondulatória. Está indicado neste gráfico um conjunto de intervalos no eixo x onde o nosso bom mecânico *Francisco*¹ deva construir e fixar uma fileira de gaiolas de Faraday que vamos ligar em paralelo num registrador de carga elétrica². O conjunto de pontos cobertos pelas gaiolas é escolhido tal que praticamente toda região onde a amplitude da onda de matéria é essencialmente diferente de zero é englobada.

Se fizermos a experiência o elétron acabaria todas as vezes nas gaiolas de Faraday, isto por que escolhemos as fendas entre as gaiolas justamente nos lugares onde a amplitude da onda é praticamente zero. Podemos formular o fato que o elétron cai reprodutivelmente nas gaiolas dizendo que o elétron na região atrás das fendas possui a propriedade de *Padrão de Interferência Francisco* (em homenagem ao trabalho artesanal de fabricar as gaiolas nos lugares corretos).

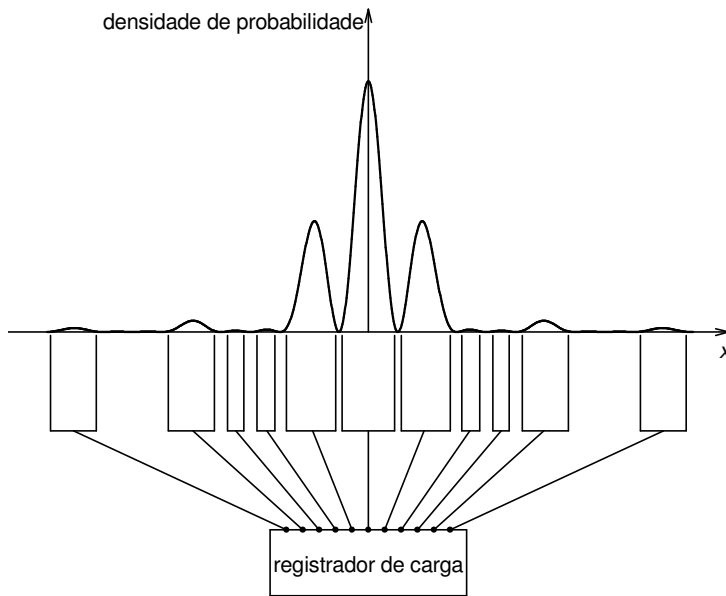


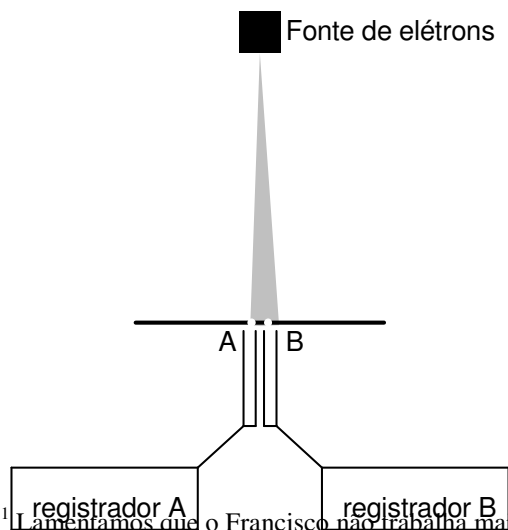
Fig. 01.01.2 Gráfico da intensidade da onda de matéria e arranjo de gaiolas de Faraday.

Agora vamos medir outro observável: vamos colocar duas gaiolas de Faraday com contadores separados um atrás de cada furo do anteparo, como indicado na figura 1.01.3. O resultado seriam contagens aleatórias nestes detectores que após muitas experiências mostrariam probabilidades iguais de encontrar o elétron atrás do furo A ou do furo B.

O fato que as respostas pelo furo flutuam é um exemplo de uma flutuação quântica. A pergunta se o elétron passou pelo furo A ou pelo furo B era uma pergunta inadequada para o estado deste elétron. O elétron neste estado não tinha lugar de estar.

Experimentalmente podemos verificar que isto é diferente do caso de ter lugar desconhecido.

Fig. 1.01.3 Pergunta experimental por qual furo passou o elétron.



Para ver qual é a diferença entre não ter lugar e ter lugar desconhecido vamos primeiro investigar o comportamento do elétron quando um dos lugares dos furos pode ser considerado o lugar da passagem do elétron. Vamos

¹ Lamentamos que o Francisco não trabalha mais no nosso Departamento.

² Na verdade gaiolas de Faraday não seriam os medidores adequados para este tipo de experimento. Usaremos as gaiolas aqui apenas de forma simbólica. Detectores mais adequadas seriam “multi-channel-plates”.

simplesmente tapar um dos furos com um obstáculo. Se fizermos agora a pergunta pelo *Padrão de Interferência Francisco* teremos de vez em quando respostas negativas. Então quando o elétron passou por um dos furos a pergunta pelo *Padrão de Interferência Francisco* é uma pergunta inadequada. Isto por que agora o padrão de intensidades calculadas com a mecânica ondulatória seria um de uma figura de difração de uma única fenda, como indicado na figura 1.01.4. Agora imagine que colocarmos algum mecanismo que bota aleatoriamente o obstáculo na frente do furo A ou B de uma forma que não fiquemos sabendo qual furo está tapado. Nesta situação podemos afirmar que os elétrons que passam pelo anteparo tinham uma das posições A ou B na hora de passar, mas não sabemos qual. Isto corresponde a um estado misto. Se perguntarmos agora pelo *Padrão de Interferência Francisco* teremos de novo respostas ocasionalmente negativas. Este comportamento seria diferente daquele dos dois furos abertos. Então a situação sem lugar de passagem e a de lugar de passagem desconhecida tem comportamentos diferentes, experimentalmente podemos distinguir-las.

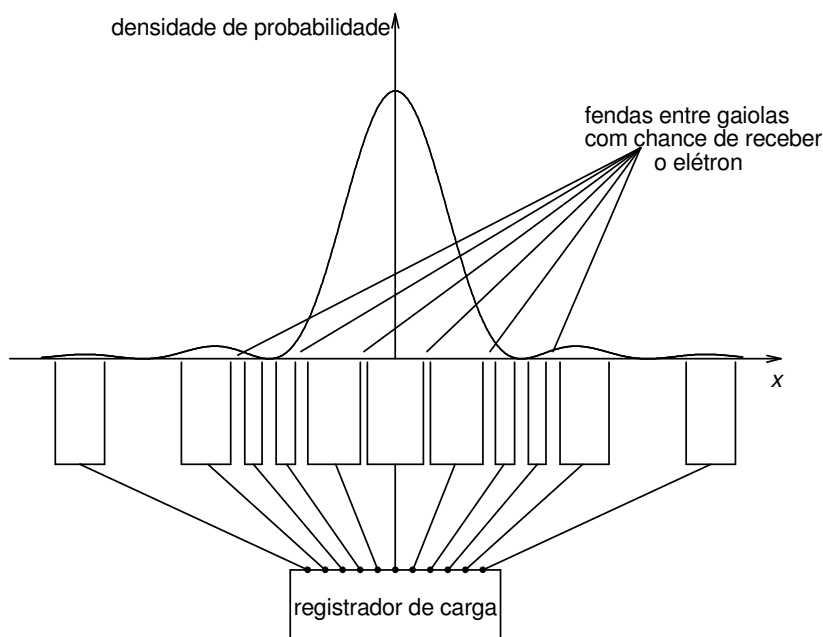


Fig. 1.01.4
Intensidade da onda de matéria com apenas um furo aberto.