



cadernos **IHU** idéias

**Física Quântica: de sua  
pré-história à discussão sobre  
o seu conteúdo essencial**

Paulo Henrique Dionísio

**ano 2 - nº 22 - 2004 - 1679-0316**

 UNISINOS

INSTITUTO  
HUMANITAS  
UNISINOS



# UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS

*Reitor*

Aloysio Bohnen, SJ

*Vice-reitor*

Marcelo Fernandes de Aquino, SJ

## **Instituto Humanitas Unisinos**

*Diretor*

Inácio Neutzling, SJ

## **Cadernos IHU Idéias**

Ano 2 – Nº 22 – 2004

ISSN 1679-0316

*Editor*

Inácio Neutzling, SJ

*Conselho editorial*

Berenice Corsetti

Dárnis Corbellini

Fernando Jacques Althoff

Laurício Neumann

Rosa Maria Serra Bavaresco

Stela Nazareth Meneghel

Suzana Kilp

Vera Regina Schmitz

*Responsável técnica*

Rosa Maria Serra Bavaresco

*Editoração eletrônica*

Rafael Tarcísio Forneck

*Revisão – Língua Portuguesa*

Mardilê Friedrich Fabre

*Revisão digital*

Rejane Machado da Silva de Bastos

*Impressão*

Impressos Portão

Universidade do Vale do Rio dos Sinos

*Instituto Humanitas Unisinos*

Av. Unisinos, 950, 93022-000 São Leopoldo RS Brasil

Tel.: 51.5908223 – Fax: 51.5908467

humanitas@poa.unisinos.br

www.ihu.unisinos.br

# FÍSICA QUÂNTICA: DA SUA PRÉ-HISTÓRIA À DISCUSSÃO SOBRE O SEU CONTEÚDO ESSENCIAL

*Paulo Henrique Dionísio<sup>1</sup>*

## 1 Introdução

A Física Quântica desperta, em muitas pessoas, interesses variados. Nascida com o século XX, bastaram algumas décadas para que influenciasse, decisivamente, a vida de todos nós, pois deu sustentação teórica à estonteante revolução tecnológica, ocorrida, principalmente, a partir dos anos cinqüenta. Concomitantemente, exigiu dos físicos profundas alterações em sua maneira de descrever os fenômenos naturais, em sua forma de compreender e explicar a natureza. Na verdade, não houve consenso. Ficaram famosas as discussões entre Einstein e Niels Bohr, centradas, principalmente, na questão do caráter probabilístico da nova teoria em oposição ao determinismo da Física Clássica e na interpretação de alguns aspectos do formalismo matemático utilizado. E as discussões perduram, apesar da sofisticação dos novos experimentos que o próprio desenvolvimento tecnológico viabiliza, realizados com o fim específico de tentar elucidar as questões pendentes. Dualidade onda-partícula, princípio da incerteza, o gato de Schrödinger, o colapso da função de onda, a ação da consciência do observador sobre o estado do sistema... Expressões como essas respingam no leigo em Física, que fica entre curioso e perplexo, às vezes, esperançoso, no mais das vezes, indiferente. Mas afinal, o que é mesmo a Física Quântica?

Em uma tentativa de interpretar os novos paradigmas nascidos com a Física Quântica, Niels Bohr formulou o seu “princípio da complementaridade”, segundo o qual os sistemas quânticos podem se apresentar sob dois aspectos aparentemente incompatíveis e mutuamente exclusivos. Quando um dos aspectos é aparente, o outro fica oculto e vice-versa, como uma moeda que nos volta apenas uma face de cada vez. Em um (nada aconselhável, advirto!) exercício de generalização, há quem proponha

---

1 Professor na Unidade de Ciências Exatas e Tecnológicas da UNISINOS. Doutor em Física, pela UFRGS.

pares de conceitos complementares (conceitos que não podem ser esclarecidos simultaneamente) ou de condições complementares (condições que não podem ser satisfeitas simultaneamente). Certa vez, em uma entrevista, alguém perguntou a Bohr<sup>2</sup>: “O que é complementar à verdade?” Ao que ele respondeu: “A clareza.”

Este texto é uma tentativa de desmentir o princípio da complementaridade, ao menos no que diz respeito ao par verdade  $\times$  clareza. O autor pretende ser “verdadeiro” ao responder a questão o que é a Física Quântica, fazendo-o de maneira fidedigna, precisa e clara. Esforça-se, ao mesmo tempo, por ser acessível aos não-físicos e manter-se adequado ao ambiente acadêmico. Para tanto, será necessário falarmos não apenas “sobre” a Física, mas também “de” Física. Trata-se, sem dúvida, de um propósito ambicioso. Seu eventual sucesso será creditado, principalmente à disposição e ao empenho de quem lê.

E, ao falar de Física, não se poderá evitar o uso de alguns recursos de linguagem que são próprios a essa disciplina, como a representação de situações por meio de figuras, a referência a grandezas físicas por meio de símbolos e algumas equações. Isso se fará, na medida do possível, de maneira acessível a quem não está habituado a esta linguagem. Afinal, vencer o aparente obstáculo, representado por uma linguagem a que não se está habituado, é um desafio intelectual freqüentemente enfrentado na vida acadêmica. Saltar alguns trechos mais técnicos talvez não prejudique de todo o entendimento do que vem depois. Podemos, também, tentar ler de trás para diante, seção por seção, a partir da Conclusão. O resultado pode ser surpreendente!

## **2 A Física ao final do Século XIX e os germens da transformação**

Por volta de 1880, a Física alcançou um estágio de desenvolvimento que parecia não apenas difícil, mas até mesmo desnecessário superar. Os trabalhos de Maxwell sobre os campos eletromagnéticos vieram completar o arcabouço teórico que se iniciara com a Mecânica de Newton e que parecia, agora, capaz de abarcar a totalidade dos fenômenos físicos. Aos físicos, restava, então, medir, com maior precisão, os valores das constantes físicas fundamentais e trabalhar na implementação de aplicações para tantos conhecimentos acumulados. Havia, é verdade, uma pequena inconsistência teórica a ser resolvida e alguns poucos fenômenos ainda não satisfatoriamente equacionados, mas tudo parecia ser apenas uma questão de tempo.

---

2 Conforme PIZA, A. F. R. de Toledo. Schrödinger, Emaranhado e Decoerência. In: HUSSEIN, Mahir; SALINAS Sílvio (org.). *100 anos de física quântica*. São Paulo: Livraria da Física, 2001, p.14.

A pequena inconsistência teórica era a assim chamada não-invariância das equações de Maxwell; sua solução resultou, nada mais nada menos, do que no surgimento da Teoria da Relatividade, uma verdadeira mudança de paradigma na Física. Já os fenômenos não satisfatoriamente explicados eram a radiação de cavidade, os espectros de raios e o efeito fotoelétrico, aos quais, mais tarde, vieram juntar-se as descobertas com tubos de raios catódicos e a radioatividade. O enquadramento teórico desses fenômenos implicou outra revolução conceitual, que resultou na Física Quântica. Assim surgiram a Teoria da Relatividade e a Física Quântica, os dois pilares da Física contemporânea.

### 3 A radiação de cavidade

Foi o estudo da chamada radiação de cavidade que desencadeou o processo de desenvolvimento da Física Quântica. Sabemos, há muito tempo, que um objeto suficientemente aquecido irradia luz, torna-se incandescente (por exemplo, um ferro em brasa na forja do ferreiro ou o filamento de uma lâmpada incandescente). Sabemos, também, que a coloração da luminosidade irradiada depende da temperatura: à medida que o objeto esquenta, sua cor passa de um vermelho fosco a um vermelho vivo, a um alaranjado, depois amarelo, branco e, finalmente, azulado. Estudando em detalhe este fenômeno, verificou-se que a coloração não depende do material, tamanho ou formato do objeto, mas apenas da temperatura em que ele se encontra. Os físicos, no entanto, preferiram estudar a luz emitida por uma cavidade feita no objeto, e não por suas paredes externas, daí o nome “radiação de cavidade”. Este mesmo fenômeno é também conhecido como “radiação de corpo negro”, por razões que não cabe aqui esclarecer.

Em termos técnicos, é mais adequado caracterizar a luz emitida por um objeto aquecido, especificando-se não a sua cor, mas a frequência das ondas luminosas. Dizermos que um objeto ostenta um brilho alaranjado, por exemplo, é uma afirmação vaga e subjetiva. Os físicos, mediante o uso de equipamentos adequados e muita dedicação, podem oferecer uma descrição muito mais precisa, objetiva e abrangente. A luz emitida pelo objeto é apenas uma pequena porção da energia por ele irradiada na forma de ondas eletromagnéticas, correspondente a uma pequena gama de valores de frequências. Além da radiação eletromagnética que vemos, e à qual denominamos “luz”, o objeto (ou a cavidade feita nele) emite também ondas eletromagnéticas de outras frequências, que se estendem em um *continuum* desde valores muito pequenos até valores muito grandes. As ondas de frequência numa faixa imediatamente inferior à da luz constituem a chamada radiação infravermelha, ou ondas de calor; as

de frequência numa faixa imediatamente superior são a chamada radiação ultravioleta. A caracterização do fenômeno completou-se de maneira satisfatória, do ponto de vista experimental, mediante a determinação precisa da quantidade de energia eletromagnética emitida em cada frequência, de tal modo que os resultados puderam ser representados em um gráfico e descritos por meio de uma relação matemática. Em outras palavras, obteve-se uma “fórmula empírica” (isto é, obtida da experiência), que permite calcular a quantidade de energia emitida a uma dada frequência por uma cavidade em um objeto aquecido a uma dada temperatura.

A descrição detalhada do fenômeno encontrou logo uma importante aplicação tecnológica. Com base nela, desenvolveu-se o “pirômetro ótico”, um instrumento que permite medir à distância a temperatura de um objeto, como, por exemplo, o interior de um forno em uma siderúrgica ou uma estrela. Mas, para a Física, isso não basta. Precisamos compreender o fenômeno, descrever seus mecanismos, explicar seus princípios gerais, enquadrá-lo em uma teoria o mais abrangente possível.

A tentativa de enquadramento teórico do fenômeno incluía considerar-se a existência de radiadores elementares nas paredes da cavidade, que seriam sistemas oscilantes dotados de carga elétrica. De acordo com a Teoria Eletromagnética, tais osciladores com carga elétrica, uma vez agitados termicamente, devido ao aquecimento do objeto, seriam emissores de radiação, mas poderiam, também, absorver radiação que, porventura, sobre eles incidisse, estabelecendo-se, então, um equilíbrio entre emissão e absorção dentro da cavidade. Os cálculos baseados em tal modelo teórico, no entanto, não conseguiam reproduzir os resultados experimentais, uma vez que previam a emissão de uma quantidade infinita de energia nas frequências mais altas, o que, evidentemente, não podia corresponder à realidade. Como esta discrepância ocorria na faixa do espectro eletromagnético denominada de “região ultravioleta”, convencionou-se chamar esta embaraçosa dificuldade de “catástrofe do ultravioleta”.

### **4 A solução proposta por Planck**

Em dezembro de 1900, Max Planck ofereceu ao mundo uma solução para a catástrofe do ultravioleta. Era o nascimento oficial da Física Quântica. A solução, no entanto, era ainda mais embaraçosa do que a dificuldade que viera superar.

A solução proposta por Planck consistia em estabelecer uma séria limitação ao movimento dos osciladores elementares. Segundo ele, um oscilador não poderia vibrar com qualquer energia, mas apenas com algumas poucas energias permitidas, cujos valores seriam múltiplos inteiros de um valor mínimo fun-

damental, denominado o *quantum* de energia do oscilador. Este mínimo fundamental seria determinado pela frequência natural de oscilação do oscilador. Em linguagem matemática, se a letra **f** representa a frequência do oscilador (ou seja, o número de oscilações que realiza por segundo), o *quantum* de energia valerá  **$h \times f$**  (ou simplesmente  **$hf$** ), onde **h** é um número, uma constante universal, denominada “constante de Planck”. Tomando-se a letra **n** para representar um número inteiro qualquer (**n** pode assumir valores como 0, 1, 2, 3 etc.), a proposta de Planck estabelece que os osciladores elementares só podem vibrar com energias tais que:

$$E = n \times hf \quad (\text{ou, simplesmente, } E = nhf) \quad (\text{equação 1}).$$

Resumindo, um oscilador elementar cuja frequência natural de oscilação seja **f** somente poderá oscilar com energias **zero,  $1 \times hf$ ,  $2 \times hf$ ,  $3 \times hf$**  e assim por diante. Em linguagem matemática, Planck “postulou”<sup>3</sup> que a energia dos osciladores é uma variável “discreta”. Na matemática, a palavra “discreta” é um antônimo para “contínua”. Ou, como passou a dizer-se, então, a energia dos osciladores é uma grandeza “quantizada”. Refazendo os cálculos, agora submetendo os osciladores elementares a esta restrição, Planck deduziu, com base em princípios teóricos, a mesma fórmula empírica extraída dos dados experimentais. A isso os físicos chamam de “explicar o fenômeno”.

A seguir, utilizando-nos de um exemplo simples, tentaremos esclarecer o significado desta proposta e a razão dos embaraços que criou.

## 5 O movimento de um pêndulo segundo Planck

“Pêndulo” é a denominação genérica para sistemas constituídos por um objeto suspenso que oscila sob a ação da gravidade. Por exemplo, o fio de prumo de um pedreiro ou um balanço em um parque infantil.

A figura 1 mostra um pêndulo oscilando até uma altura **A** acima da posição inferior de sua trajetória. Por conveniência, chamaremos a altura **A** de “amplitude de oscilação”. Designaremos a massa do objeto suspenso por **M**, o comprimento do fio por **C** e a frequência de oscilação por **f**.

3 Segundo o dicionário Houaiss, um postulado é “o que se considera como fato reconhecido e ponto de partida, implícito ou explícito, de uma argumentação; premissa”. Ou ainda, “afirmação ou fato admitido sem necessidade de demonstração”.

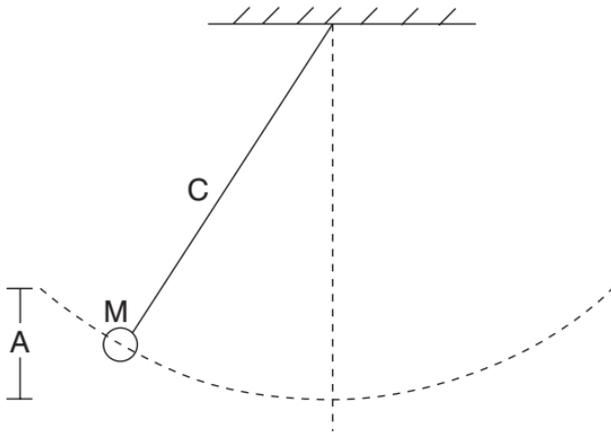


Figura 1 – Um pêndulo de massa  $M$  e comprimento  $C$ , oscilando até uma altura  $A$ .

Quem já andou de balanço sabe que, quanto mais longas as cordas que o suspendem, mais lentas e suaves são as suas oscilações, ou seja, menor é a sua freqüência. Se o comprimento do pêndulo for medido em metros e a freqüência, em oscilações por segundo, esta afirmativa pode ser traduzida na relação matemática

$$f = 1/\sqrt{2C} \quad (\text{equação 2}).$$

Em geral, a freqüência é menor do que um. Por exemplo, se  $f = 1/2$ , significa que o pêndulo realiza meia oscilação em um segundo, ou seja, leva dois segundos para realizar uma oscilação completa.

Já a amplitude de oscilação  $A$  (“altura”) depende da energia  $E$  que se fornece ao pêndulo para oscilar e do peso  $P$  do objeto suspenso. Quanto maior a energia, maior a altura; quanto maior o peso, menor a altura:

$$A = E/P \quad (\text{equação 3}).$$

O movimento de um pêndulo é perfeitamente compreendido no contexto da Física Clássica, e as relações acima podem ser deduzidas das leis de Newton. Vejamos, no entanto, a consequência de admitirmos como correta a hipótese de Planck sobre a quantização da energia. Submetendo-se a energia de oscilação  $E$  à condição de ser quantizada, a amplitude de oscilação  $A$  também o será, pois uma depende da outra, conforme mostra a equação 3. Substituindo-se, na equação 3, a condição de quantização de Planck  $E = nhf$  (equação 1), obtemos:

$$A = \frac{E}{P} = \frac{nhf}{P} = n \times \frac{hf}{P} \quad (\text{equação 4}).$$

A equação 4 mostra que existe um *quantum* de amplitude de oscilação  $hf/P$ , de modo que a amplitude de oscilação **A** do pêndulo somente poderá assumir valores que sejam múltiplos inteiros dele.

Em termos práticos, se alguém for embalar uma criança em um balanço cujo *quantum* de amplitude seja, por exemplo, 30 cm, deverá ajustar o impulso dado para que a altura atingida seja exatamente ou 30 cm, ou 60 cm, ou 90 cm, ou 120 cm e assim por diante. Se tentar imprimir ao balanço uma oscilação a uma altura proibida, (100 cm, por exemplo), o balanço “simplesmente se recusará a mover-se” e a pessoa receberá seu impulso de volta, sendo jogada para trás. Ora, nenhum balanço, nem o pêndulo de um relógio, nem qualquer oscilador físico que conheçamos funciona assim. Como, então, aceitar a hipótese de Planck, segundo a qual os osciladores elementares nas paredes da cavidade funcionariam assim?

Planck inaugurou uma era de perplexidade no mundo da Física. Por um lado, logrou construir uma teoria capaz de explicar em todos os detalhes o fenômeno que se propunha, capaz de descrever adequadamente o comportamento do sistema físico em estudo. Mas, por outro lado, deixou-nos na embaraçosa situação de termos que aceitar como verdadeira uma hipótese inteiramente contrária aos fatos, ao senso comum e à própria Física Clássica. Nas palavras do próprio Planck, “tratou-se de uma hipótese puramente formal, e não refleti muito sobre ela, mas apenas sobre o fato de que, sob quaisquer circunstâncias, custasse o que custasse, um resultado positivo tinha de ser obtido”<sup>4</sup>. A partir deste primeiro episódio um tanto acachapante, outros semelhantes seguiram-se, envolvendo outros fenômenos e outros pesquisadores. A Física Quântica avançou, tornou-se uma teoria consistente e abrangente, ofereceu uma descrição adequada dos fenômenos em escala atômica e subatômica, o que pode ser comprovado pelo sucesso da tecnologia à qual deu sustentação. Porém, a cada passo constrangeu os físicos a admitirem mais uma hipótese aparentemente absurda, contrária ao senso comum e, principalmente, incompatível com a já consagrada Física Clássica.

## 6 Uma digressão sobre números pequenos

Antes de prosseguirmos no relato dos episódios que se seguiram ao feito de Planck, é forçoso aprofundar um pouco a discussão a respeito da contradição entre a sua maneira de descrever a dinâmica dos osciladores físicos e a descrição contida na mecânica newtoniana. Para tanto, devemos levar em conta o va-

---

4 Conforme FLEMING, Henrique. Max Planck e a Idéia do Quantum de Energia. In: HUSSEIN, Mahir; SALINAS, Sílvio (org.). *100 anos de física quântica*. São Paulo: Livraria da Física, 2001, p.10.

lor da constante de Planck  $h$ , valor por ele obtido mediante o simples ajuste numérico entre o seu cálculo teórico e os dados experimentais. A constante de Planck vale

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \times \text{s} \quad (\text{equação 5}),$$

onde  $s$  é o símbolo para segundo, nossa conhecida unidade de medida de tempo; e  $J$  é o símbolo para joule, uma unidade de medida de energia.

A presença do fator  $10^{-34}$  indica que o valor numérico de  $h$  é extremamente pequeno. Tendo em vista a provável pouca familiaridade de alguns leitores com este tipo de notação, procuraremos esclarecer o seu significado por meio de um exemplo, qual seja, o das unidades de medida de comprimento.

Um milímetro vale um milésimo de um metro, isto é, o milímetro é obtido dividindo-se o metro em mil partes. Em linguagem matemática, escrevemos que 1 mm vale 0,001 m. Mas, dividir por mil é o mesmo que dividir três vezes sucessivas por dez. Esta última afirmativa é melhor expressa em linguagem matemática pelo enunciado “1 mm vale  $10^{-3}$  m”. Nesta notação, o sinal – no expoente da base 10 indica divisão por dez e o número 3 indica três divisões sucessivas. Essa maneira de escrever é geralmente referida como “notação científica”. Costumamos, também, dizer que o milímetro é três “ordens de grandeza” menor do que o metro. Para ter uma idéia do que significa isso na prática, tome uma trena e compare uma divisão de um milímetro com o comprimento de um metro. Assim, se quisermos, por exemplo, expressar o comprimento de 5 milímetros em metros, podemos escrever

$$5 \text{ mm} = 0,005 \text{ m} \quad \text{ou} \quad 5 \text{ mm} = 5 \times 10^{-3} \text{ m}.$$

Um metro é um milésimo de um quilômetro, ou seja, para obtermos um metro a partir de um quilômetro, devemos dividir este por mil, ou três vezes sucessivas por dez. Então, para obtermos um milímetro a partir de um quilômetro, este deverá ser dividido primeiro por mil para obtermos um metro e, em seguida, novamente por mil para obtermos o milímetro. Um milímetro é, então, seis ordens de grandeza menor do que um quilômetro, e isso é o mesmo que dizer que um milímetro é a milionésima parte de um quilômetro. Assim, por exemplo,

$$\begin{aligned} 5 \text{ mm} &= 0,005 \text{ m} = 0,000 \ 005 \text{ km} \\ &\text{ou} \\ 5 \text{ mm} &= 5 \times 10^{-3} \text{ m} = 5 \times 10^{-6} \text{ km}. \end{aligned}$$

Observe que a notação científica economiza zeros e espaço. A espessura de uma folha de papel é cerca de 10 microns. Um micron (símbolo:  $\mu$ ) é a milésima parte de um milímetro.

Então, se quisermos expressar a espessura de uma folha de papel em quilômetros, teremos  $10^{-8} = 0,000\ 000\ 01$  km ou  $10^{-8} = 10^{-8}$  km. Já o raio de um átomo vale justamente cerca de  $10^{-8}$  centímetros. Ou seja, a proporção entre o tamanho de um átomo e um centímetro é a mesma que entre a espessura de uma folha de papel e um quilômetro. O raio do núcleo é da ordem de  $10^{-15}$  metros: quinze ordens de grandeza separam nosso mundo do mundo subatômico! Hoje, podemos “ver” um átomo por meio de um microscópio eletrônico de tunelamento (outra conquista da Física Quântica), mas não existe instrumento que permita igual façanha no que diz respeito ao núcleo.

## 7 O pêndulo segundo Planck × o pêndulo segundo Newton

A constante de Planck, cujo valor foi apresentado antes, é expressa em termos das grandezas físicas energia e tempo, sendo a energia medida em joules (símbolo: **J**) e o tempo medido em segundos (símbolo: **s**). Uma duração de um segundo é fácil de estimar; esclareçamos, então, o que representa uma energia de um joule:

*um joule é a energia necessária para elevar-se um objeto de 100 gramas a um metro do solo.*

Na constante de Planck, aparece o fator  $10^{-34}$ . Vamos distribuir arbitrariamente essas trinta e quatro ordens de grandeza igualmente entre a energia e o tempo, de modo a concluir que, a grosso modo, a constante de Planck refere-se a fenômenos cuja duração é da ordem de  $10^{-17}$  segundos e envolvem energias da ordem de  $10^{-17}$  joules. Ou seja, refere-se a fenômenos de duração dezessete ordens de grandeza menor do que um segundo, envolvendo energias dezessete ordens de grandeza menor do que a energia gasta por alguém para apanhar um objeto de cem gramas do solo e depositá-lo sobre uma mesa. Lembremos que o núcleo atômico é quinze ordens de grandeza menor do que um metro. Logo, mesmo sendo verdadeira a hipótese de Planck sobre a quantização dos osciladores físicos, ela não deve afetar significativamente os sistemas macroscópicos, cujas dimensões são aquelas a que estamos habituados.

Um exemplo prático esclarecerá a última afirmação acima. Seja um pêndulo feito com um objeto de 100 gramas suspenso por um fio de 8m, oscilando até a altura de 1m. A energia envolvida na oscilação é exatamente um joule, conforme a definição de joule apresentada acima. A frequência, calculada pela equação 2, vale um quarto de oscilação por segundo, o que vale dizer que o pêndulo leva quatro segundos para realizar uma oscilação completa. O *quantum* de amplitude de oscilação, calculado pela equação 4, resulta igual a  $1,66 \times 10^{-34}$  m. Isso é dezenove ordens

de grandeza menor do que um núcleo atômico, que, por sua vez, é quinze ordens de grandeza menor do que um metro. Ora, se não nos é possível ver o núcleo, com mais razão ainda não poderemos perceber variações dessa ordem de grandeza na amplitude de oscilação do pêndulo, seja qual for o meio de observação ou instrumento de medida de que possamos dispor. Isso equivale a dizer que, para fins práticos, o discreto confunde-se com o contínuo e tanto faz considerar-se a amplitude de oscilação do pêndulo uma grandeza contínua à maneira de Newton ou quantizada à maneira de Planck.

Mas, quando voltamos nossa atenção para o mundo microscópico<sup>5</sup>, a situação é outra. Por exemplo, a energia envolvida na interação de um elétron com um núcleo atômico é da ordem de  $10^{-19}$  J e os seus *quanta*, ou seja, o valor das variações que lhe são permitidas, são desta mesma ordem de grandeza. Então, quando se acresce ou subtrai um único *quantum* à energia do sistema, ela varia apreciavelmente, de modo que seu caráter quântico fica evidente (veja o funcionamento de um pêndulo cujo *quantum* de energia é comparável à sua energia total no segundo parágrafo abaixo da equação 4). Em outras palavras, os efeitos quânticos dominam o comportamento do sistema. Como veremos adiante, esta foi a explicação encontrada por Niels Bohr para os chamados espectros de raios, mencionados anteriormente como um dos fenômenos não passíveis de entendimento no contexto da Física Clássica.

Os exemplos acima mostram que a descrição quântica é adequada tanto ao mundo macroscópico quanto ao mundo microscópico. Mas, no que diz respeito ao comportamento dinâmico dos sistemas com os quais interagimos no dia-a-dia, podemos dispensá-la, uma vez que os detalhes que fornece não são de interesse prático. Aliás, a Física Clássica aplica-se aí satisfatoriamente, inclusive com algumas vantagens, uma das quais é a simplicidade. O contrário, no entanto, não é verdadeiro: a descrição clássica não corresponde ao comportamento do mundo microscópico. Assim, a Física Quântica, por abranger a Física Clássica e ir além dela, é considerada mais adequada, mais completa, mais “verdadeira”.

Mas devemos reconhecer que a aceitação da hipótese de Planck implica uma mudança fundamental em nossa concepção acerca da natureza dos sistemas físicos. A situação é análoga à ocorrida, quando da aceitação das hipóteses sobre a constituição atômica da matéria. Antes, quando servíamos vinho em um copo, por exemplo, víamos um fluido contínuo, rubiáceo e apetitoso, jorrando da garrafa. Hoje, vemos a mesma coisa e de-

---

5 Micro em oposição a macro. Neste texto, usaremos a expressão “mundo microscópico” para designar o mundo das moléculas, dos átomos, das partículas elementares.

pois saboreamos com igual prazer, mas “sabemos” que se trata de uma cascata de partículas ínfimas, aliás bem separadas entre si, às quais chamamos “moléculas”. Da mesma maneira, quando observamos um balanço que vai parando, por mais que pareça fazê-lo de maneira contínua e suave, “sabemos” que vai perdendo “impulso” “aos trancos”, embora isso em nada altere o conforto e o prazer de quem está sentado nele... Na verdade, essas novas concepções não alteram diretamente nossas relações com o mundo que nos rodeia, pois dizem respeito a fenômenos que ocorrem em uma escala extremamente pequena, inatingível por nossos sentidos, ausente de nossa experiência. Eis aí uma circunstância à qual deveriam estar atentos alguns que propõem a pura e simples transposição dos conceitos da Física Quântica para o nosso mundo habitual, sugerindo aplicações imediatas na medicina, na psicologia, na economia, no direito... É claro que não estamos nos referindo à enorme transformação ocorrida em nossas vidas devido ao impacto tecnológico decorrente, em última análise, do domínio do mundo microscópico, proporcionado ao homem por essa nova Física. Mas isso já é outro assunto.

## 8 Einstein e os fótons

Em 1905, em seu chamado “ano miraculoso”, em um dos cinco artigos que publicou nos *Annalen der Physik*, Einstein propôs uma idéia revolucionária: a quantização do campo eletromagnético. De acordo com a Eletrodinâmica Clássica de Maxwell, uma onda eletromagnética é contínua no tempo e no espaço e sua intensidade é determinada pela amplitude do seu campo elétrico. Em seu artigo, contudo, Einstein escreveu<sup>6</sup>:

*De acordo com a hipótese aqui considerada, na propagação de um raio de luz emitido por uma fonte puntiforme, a energia não é distribuída sobre volumes cada vez maiores no espaço, mas consiste em um número finito de quanta de energia, localizados em pontos do espaço, que se movem sem se dividir e que podem ser absorvidos ou gerados somente como unidades integrais.*

Ora, “um *quantum* de energia localizado em um ponto do espaço, que se move sem se dividir e que somente pode ser absorvido ou gerado como uma unidade integral” corresponde muito mais ao conceito de uma partícula em movimento do que ao de uma onda que se propaga. Tais “partículas de luz” foram chamadas de “fótons”. Einstein estabeleceu que a energia de um fóton vale o produto da constante de Planck pela frequência

---

6 STACHEL, John (organização e introdução). *O ano miraculoso de Einstein*. Rio de Janeiro: UFRJ, 2001. p. 202.

da radiação:  $E = h \times f$ . Apesar da semelhança formal, as hipóteses de Planck e de Einstein são essencialmente diferentes. Planck propôs a quantização de uma “grandeza” associada a um sistema físico (a energia de oscilação do oscilador); já o *quantum* de Einstein é, ele próprio, “um ente físico”.

Nesse mesmo artigo, Einstein usou sua hipótese para explicar, entre outros fenômenos, o efeito fotoelétrico, então razoavelmente caracterizado do ponto de vista experimental, mas carente de uma interpretação satisfatória no contexto da Eletrodinâmica Clássica. Tal explicação foi uma das razões pelas quais ganhou o Prêmio Nobel em 1921.

Eis-nos diante de outra situação contraditória. A natureza da luz fora objeto de disputa por séculos. Experimentos realizados a partir de 1800, no entanto, deixaram inequívoco o seu caráter ondulatório, por apresentar efeitos de difração e de interferência, tal como as ondas sonoras no ar ou ondas na superfície da água. Newton considerava a luz como feita de partículas; para explicar a refração, precisava supor que sua velocidade fosse maior nos meios mais densos. Contudo, medidas precisas mostraram que a velocidade da luz na água é menor do que no ar, o que invalidou a concepção newtoniana. Finalmente, na grande síntese de Maxwell, a natureza da luz ficou inteiramente esclarecida, pois foi ela descrita como uma onda eletromagnética. Esse foi justamente um dos momentos culminantes da Eletrodinâmica Clássica. Deveria ser tudo isso agora abandonado em favor, novamente, de uma teoria corpuscular para a luz?

Aqui, a situação era um pouco mais favorável à Física Clássica do que no caso dos osciladores físicos, pois a teoria ondulatória da luz não poderia ser simplesmente englobada pela nova teoria corpuscular. Quando estavam em jogo fenômenos relacionados com a geração ou a absorção da luz pela matéria, a visão quântica se fazia indispensável. Mas quando se tratava de descrever os mecanismos de propagação da luz, era necessário considerá-la uma onda. Era, então, necessário conservar as duas concepções, por mais contraditórias que parecessem. Esta maneira ambígua de a luz apresentar-se aos olhos dos físicos foi o que se chamou de “dualidade onda partícula”.

## 9 O átomo de Rutherford

Enquanto Planck e Einstein explicavam as inusitadas características da radiação de cavidade e do efeito fotoelétrico, a Física Experimental continuava a desnudar aos olhos humanos o mundo microscópico. As pesquisas com tubos de raios catódicos levaram a descobertas, como a existência dos raios-X e dos elétrons. Os raios-X foram caracterizados como ondas eletromagnéticas de alta frequência, os elétrons como partículas dotadas de carga elétrica negativa e de dimensões e massa infinitesimais.

mais. A radioatividade foi descoberta, e a hipótese sobre a constituição atômica da matéria ganhou solidez.

Por volta de 1910, Rutherford e seus colaboradores realizaram experiências com o fim de elucidar a estrutura do átomo. Tais experiências consistiam em bombardear finíssimas lâminas de ouro com as recém-descobertas partículas alfa. Esperavam ver as partículas alfa ricocheteando após se chocarem contra a compacta barreira metálica. O que viram, no entanto, foi surpreendente: a maior parte das partículas simplesmente atravessava a lâmina, sofrendo pequenos desvios, raríssimas eram refletidas de volta. Cuidadosa análise dos dados permitiu concluir que se deveria considerar a carga positiva do átomo de ouro como confinada em uma diminuta região do espaço, onde também se concentraria a sua massa, sendo a maior parte do volume do material ocupada pelos elétrons, de massa infinitamente menor, incapazes de impedir a passagem das “pesadas” partículas alfa. Ou seja, o metal, aparentemente sólido e compacto, seria, na verdade, vazio e transparente como uma peneira!

Rutherford propôs, então, o modelo planetário do átomo: no centro, um núcleo dotado de carga elétrica positiva, contendo quase toda a massa atômica; girando em torno dele, os levíssimos elétrons. Um modelo atraente por sua semelhança com o sistema solar, com a única diferença de que, neste, a força que mantém os planetas ligados ao Sol é de natureza gravitacional, enquanto naquele, os elétrons são atraídos ao núcleo por uma força de natureza elétrica.

Havia, porém, uma dificuldade: estávamos, novamente, diante de uma proposta incompatível com a Física Clássica. Segundo a Eletrodinâmica Clássica, os elétrons em translação em torno do núcleo, por serem dotados de carga elétrica, irradiariam continuamente ondas eletromagnéticas, perdendo energia e “impulso”, até finalmente caírem sobre o núcleo. Em outras palavras, o átomo de Rutherford não poderia existir como uma estrutura estável. Uma instabilidade deste tipo evidentemente não afeta os planetas em torno do Sol nem os satélites artificiais em torno da Terra, pois esses não são objetos eletrizados. Mas foi algo parecido que ocorreu com as estações espaciais Skylab e Mir: enquanto percorriam suas órbitas em torno da Terra, perdiam, progressivamente, energia devido ao atrito com as camadas superiores da atmosfera. Não havendo reposição da energia perdida, foram perdendo “impulso” até caírem.

## 10 Bohr explica o átomo

Niels Bohr tomou a si a tarefa de encontrar justificativas teóricas, capazes de suportar o modelo atômico de Rutherford. De início, não levou em conta as experiências a respeito dos espectros de raios dos elementos, um dos fenômenos que restavam

sem explicação ao final do século XIX, conforme mencionamos na seção 2. Já em 1885, Balmer havia encontrado uma fórmula empírica que descrevia perfeitamente as raias espectrais do hidrogênio, fórmula esta depois aperfeiçoada por Rydberg. Alguém advertiu Bohr de que um modelo atômico bem sucedido deveria elucidar aqueles resultados antigos. Na verdade, ocorreu o contrário: bastou a Bohr um rápido olhar sobre a fórmula de Balmer-Rydberg para vislumbrar a solução do problema, sendo capaz, ao mesmo tempo, de justificar o átomo de Rutherford e explicar os espectros de raias. Mas, para tanto, foi necessário, como antes já haviam feito Planck e Einstein, que entrasse em conflito com a Física Clássica.

Esclareçamos em que consistem os espectros de raias dos elementos. Conforme descrevemos anteriormente, a frequência das ondas eletromagnéticas, emitidas por uma cavidade em um objeto incandescente, estende-se em um *continuum* desde valores muito pequenos até valores muito grandes, isto é, a radiação de cavidade varre um “espectro contínuo”. No que diz respeito à porção deste espectro que podemos ver, a qual chamamos luz, isso é facilmente verificável. Basta olhar para o objeto (ou cavidade) através de um prisma, e veremos todas as cores, como em um arco-íris, sem limites definidos entre uma e outra, passando por todos os matizes intermediários. Aliás, o arco-íris que se forma no céu, é uma evidência de que o espectro solar (o conjunto de frequências contidas na luz que o Sol emite) é um espectro contínuo. Imaginemos que, um dia, ao olharmos para o céu, vissemos um arco-íris estranho, contendo, digamos, apenas quatro linhas coloridas, bem definidas e separadas, uma vermelha, uma alaranjada, uma verde e uma violácea. Isso seria uma evidência de que, nesse dia, o Sol desistira de emitir luz de todos os infinitos matizes possíveis, concentrando-se em apenas quatro cores bem definidas, ou seja, tornara-se um emissor de um espectro discreto, um “espectro de raias”.

Pois verificou-se que amostras gasosas dos elementos químicos, quando estimuladas por aquecimento em uma chama ou por passagem de corrente elétrica, emitem radiação sob a forma de espectros de raias. O número de raias e suas cores (frequências) são sempre as mesmas para um mesmo elemento, constituindo-se em uma espécie de assinatura ou impressão digital do mesmo. Este fato é a base da espectroscopia óptica, uma técnica que permite descobrir a composição de uma substância mediante a análise da luz que emite ou absorve.

Consideremos o hidrogênio, o mais leve e, portanto, o mais simples dos elementos químicos. De acordo com o modelo planetário de Rutherford, seus átomos devem ser constituídos por um único elétron orbitando em torno de um núcleo. A parte visível de seu espectro ostenta quatro raias, nas cores vermelha, verde-azulada, anil e violeta. A fórmula de Balmer-Rydberg que descreve o espectro de raias do hidrogênio pode ser escrita como

$$f = \frac{R_H}{n^2} - \frac{R_H}{m^2} \quad (\text{equação 6}).$$

Nela,  $f$  é a frequência da luz emitida,  $R_H$  é um número chamado de “constante de Rydberg para o hidrogênio” e  $n$  e  $m$  são números inteiros. Fazendo-se  $n$  igual a 2 e  $m$  igual a 3, ou 4, ou 5, ou 6, obteremos, precisamente, as frequências das quatro raias visíveis no espectro de uma amostra de hidrogênio, na ordem em que foram enumeradas acima. Bohr percebeu de imediato que bastaria multiplicar a equação 6 pela constante de Planck  $h$  para ter, do lado esquerdo da igualdade, o *quantum* de energia de Einstein  $e$ , do lado direito, a diferença entre duas quantidades, identificadas cada uma por um número inteiro,  $m$  ou  $n$ :

$$h \times f = \frac{h \times R_H}{n^2} - \frac{h \times R_H}{m^2} \quad (\text{equação 7}).$$

Bohr assumiu então, “como princípio”, a existência de trajetórias em torno do núcleo, as quais denominou “estados estacionários”, podendo um elétron percorrê-las sem perder energia. Bohr estipulou, também, que a cada um desses estados corresponde uma quantidade de energia  $E_k$  que pode ser calculada como

$$E_k = -\frac{h \times R_H}{k^2} \quad (\text{equação 8}),$$

onde  $k$  é um número natural que identifica a órbita ou estado em que o elétron se encontra;  $k$  é conhecido como “número quântico”. A emissão de um fóton, segundo Bohr, ocorre quando um elétron salta de um estado de maior energia para outro de menor energia, devendo a energia do fóton emitido ser igual à energia perdida pelo elétron neste salto. Por exemplo, se, na equação 8, fizermos  $k = 3$ , teremos  $E_3$ , a energia do terceiro estado estacionário; se fizermos  $k = 2$ , teremos  $E_2$ , a energia do segundo estado estacionário. A diferença entre essas duas quantidades mede a energia perdida por um elétron que “cai” do terceiro para o segundo estado estacionário:

$$E_3 - E_2 = -\frac{h \times R_H}{3^2} - \left( -\frac{h \times R_H}{2^2} \right) = \frac{h \times R_H}{2^2} - \frac{h \times R_H}{3^2} \quad (\text{equação 9}).$$

Mas esta deve ser também a energia  $E = hf$  fóton emitido no processo. Então,

$$h \times f = \frac{h \times R_H}{2^2} - \frac{h \times R_H}{3^2} \quad (\text{equação 10}).$$

A equação 10 é a própria equação 7 com  $n = 2$  e  $m = 3$ , a qual, por sua vez, dividida por  $h$ , reproduz a equação 6. Em outras palavras, Bohr obteve, com base em seus pressupostos teóricos, precisamente a fórmula empírica de Balmer-Rydberg, ou seja, explicou teoricamente os espectros de raias.

## 11 O Princípio da Correspondência

Mas, faltava ainda obter o valor da constante de Rydberg com base em pressupostos teóricos. Para tanto, Bohr usou de um artifício que mais tarde formulou como um princípio, o chamado “princípio da correspondência”. A idéia é a mesma que surgiu, quando comentamos o funcionamento de um pêndulo: a descrição quântica deve convergir para a descrição clássica, quando as dimensões do sistema quântico ou o valor de suas variáveis dinâmicas crescem, assumindo valores típicos de sistemas macroscópicos. Nesse caso, Bohr considerou que, para grandes valores de  $m$  e  $n$ , a frequência do fóton emitido deve corresponder à frequência da radiação prevista pela Eletrodinâmica Clássica. Pôde, assim, calcular um valor teórico para  $R_H$  em perfeito acordo com o valor experimental já estabelecido, o que serviu como confirmação para suas hipóteses<sup>7</sup>.

Estranha maneira de fazer Física, a de Bohr. Propôs como princípio justamente o que não entendia e precisava explicar: a existência dos estados estacionários. Ao assim proceder, entrou em franco confronto com a eletrodinâmica clássica. E tomou como a energia de tais estados exatamente o valor extraído da fórmula empírica que almejava, mas não pôde deduzir com base nos princípios gerais. E ainda exigiu que seu resultado fosse consistente, no limite, com a Física Clássica, a qual estava, ao mesmo tempo, contrariando. Não é à toa que alguns eminentes físicos disseram, então, que, caso Bohr estivesse correto, abandonariam a Física. Outros, no entanto, consideraram seus resultados de suma importância e seguiram seus passos, fazendo avançar a descrição dos sistemas atômicos.

## 12 As ondas de matéria de Broglie

Cerca de dez anos decorreram desde a proposta de Einstein sobre a natureza dual da luz em 1905 até o sucesso de Bohr na explicação da estrutura atômica. Outro tanto tiveram que esperar os físicos até que mais um passo importante fosse dado para o desenvolvimento de uma Física dos *quanta*. Tal passo foi dado

---

7 Os livros didáticos costumam dar outra versão para os procedimentos de Bohr. Baseamo-nos aqui no relato de SEGRÉ, E. *Dos raios-X aos quarks*. Brasília: Universidade de Brasília, 1987. p.126 e seguintes.

em 1924 por Louis de Broglie, ao propor o comportamento ondulatório da matéria<sup>8</sup>.

Desta vez, a inspiração não veio de algum fenômeno inexplicado ou experimento a ser interpretado. De Broglie baseou sua proposta em uma concepção um tanto filosófica, um tanto poética a respeito da natureza, mas bastante freqüente entre os físicos: a idéia de que a natureza deve ser simétrica. Ora, estava claro que um raio de luz, um ente físico cujo caráter ondulatório estivera por tanto tempo bem estabelecido, apresentava-se, de fato, com um aspecto dual, devendo, às vezes, ser visto com fei-to de partículas. Por que não admitir que, simetricamente, as partículas, os objetos materiais, não estivessem também a es-conder um insuspeitado caráter ondulatório?

Além da freqüência  $f$ , uma onda pode também ser caracte-rizada por uma outra grandeza, chamada de “comprimento de onda”, usualmente representada pela letra grega  $\lambda$ . Seguindo argumentos que não cabe aqui detalhar, de Broglie sugeriu que, a um objeto de massa  $M$ , que se move com velocidade  $V$ , de-ve-se associar um comprimento de onda expresso pela relação:

$$\lambda = h/MV \quad (\text{equação 11}).$$

onde  $h$ , novamente, é a constante de Planck.

De Broglie atribuía realidade física a suas ondas, às quais referia-se como “ondas de matéria”. Em sua concepção, as par-tículas apresentavam comportamento ondulatório, porque viaja-vam no espaço conduzidas por estas ondas, acompanhando a sua propagação. Algo como um surfista “pegando uma onda”... Daí serem elas chamadas, também, de “ondas piloto”.

A proposta de Broglie recebeu confirmação experimental em 1927, quando foi observado o fenômeno da difração de elé-trons, isto é, partículas exibindo comportamento ondulatório. Um importante avanço tecnológico baseado nesta descoberta foi a invenção do microscópio eletrônico. Mas a comunidade de físicos não esperou por essa confirmação para considerar plau-sível o caráter dual das partículas. Já em 1925, Schrödinger, ins-pirado por essa idéia, desenvolveu o que finalmente se poderia chamar de uma verdadeira teoria quântica.

### 13 Os pilares da Física Quântica em sua fase pré-histórica

Para melhor avaliarmos o significado da contribuição de Schrödinger, façamos antes uma revisão crítica dos progressos

8 Em 1917, Einstein publicara um importante trabalho a respeito da interação en-tre um sistema físico quantizado e o campo eletromagnético, no qual obtivera resultados de grande impacto. Mas Einstein “corria por fora”, mais interessado na quantização dos campos do que no comportamento dinâmico das partí-culas, que dominava o interesse geral.

relatados até aqui. Essa Física Quântica, cujos momentos mais significativos acabamos de descrever, é, às vezes, referida como a “antiga Mecânica Quântica”. Talvez fosse apropriado denominar esse período de “fase pré-histórica da Física Quântica”, pois o que ocorreu a seguir representou, para a nova disciplina, algo análogo à invenção da escrita para a humanidade.

Aquele primeiro quarto de século foi, sem dúvida, uma fase de grandes realizações. A dinâmica que rege o mundo microscópico começou a ser entendida, e vários fenômenos encontraram uma descrição plausível. A estrutura do átomo começou a ser desvendada e a tabela periódica dos elementos, antiga conhecida dos químicos, começou a ser explicada por argumentos físicos. Mas as bases teóricas e conceituais sobre as quais se assentava essa construção eram muito frágeis. Tratava-se, na verdade, de princípios esparsos, enunciados com o fim específico de atender a uma necessidade pontual, como a “hipótese puramente formal” de Planck ou os postulados *ad hoc* de Bohr. Outro exemplo é o “princípio da exclusão” de Pauli, segundo o qual um estado estacionário em um átomo pode abrigar, no máximo, dois elétrons. Este princípio não se baseou em nenhuma idéia fundamental ou essencial, mas foi estabelecido com a única finalidade de explicar por que, em um átomo com muitos elétrons, eles não caem todos no estado de menor energia. Mais um princípio formulado “sob encomenda”, neste caso para viabilizar o entendimento da tabela periódica dos elementos.

Se quiséssemos identificar as linhas mestras que orientavam o trabalho dos físicos de então, optaríamos por designar as já mencionadas idéias da dualidade onda-partícula e do princípio da correspondência. Em resumo, os físicos ressentiam-se da falta de postulados autênticos, de princípios gerais sobre os quais pudessem assentar uma verdadeira teoria consistente, eficiente e abrangente. A Física vivia, de fato, uma situação não muito favorável à sua auto-estima como Ciência...

## 14 A Equação de Schrödinger e o início da fase histórica

A solução para esta desconfortável situação veio através de uma equação matemática proposta por Schrödinger em 1926, a qual apresentamos abaixo:

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right) \Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (\text{equação 12}).$$

Aí está um excelente exemplo daquilo que chamamos “um modelo matemático para a descrição de um dado conjunto de fenômenos físicos”. Para o leigo, uma dúzia de símbolos incompreensíveis dispostos segundo algum critério hermético. Para o

físico, o preenchimento das lacunas existentes na Física Quântica em sua fase pré-histórica. A equação de Schrödinger contém em si, ao mesmo tempo, os procedimentos necessários à solução de um problema físico e os princípios que os embasam. Ela é “a própria teoria”, a tão desejada teoria! Isso ficará claro com o relato de sua aplicação ao átomo de hidrogênio, logo a seguir.

Nesta equação,  $m$  representa a massa da partícula cujo comportamento dinâmico desejamos descrever;  $V$  é uma função que representa a “energia potencial” da partícula, grandeza esta que contém a informação sobre como o mundo exterior age sobre ela, como influencia o seu movimento; a presença da variável tempo é indicada pela letra  $t$ ; a variável espaço está contida no símbolo  $\nabla$ .  $\hbar$  é a própria constante de Planck, só que dividida pelo fator constante  $2\pi$ . Como na álgebra elementar, resolver a equação significa “achar o valor da incógnita”, aqui representada pela letra grega  $\psi$ . Mas a equação de Schrödinger não é uma equação algébrica comum, e sim uma equação diferencial. Neste caso, a solução  $\psi$  não é apenas um número ou conjunto de números, e sim uma função matemática.  $\psi$  é função das variáveis “tempo” e “posição da partícula” e é usualmente conhecida como a “função de onda”, mas preferimos chamá-la de “função de estado” da partícula. “Toda a informação que se pode obter sobre o comportamento dinâmico da partícula está contida na função de estado  $\psi$ .”

Schrödinger aplicou, de imediato, a sua equação ao átomo de hidrogênio. Para tanto, bastou substituir nela a letra  $m$  pelo valor da massa do elétron e a letra  $V$  pela função que representa a energia potencial de interação (atração) entre o elétron e o núcleo, conhecida da Eletrostática. Resolvendo a equação, Schrödinger encontrou os resultados abaixo descritos e comentados:

- 1) A equação só apresenta soluções para determinados valores de energia, ou seja, a energia do átomo de hidrogênio é uma variável discreta, quantizada. Assim, não há necessidade de nenhum postulado, afirmando *a priori* a quantização da energia ou a existência de estados estacionários. Tudo decorre naturalmente da solução da equação, dos procedimentos meramente matemáticos adotados para resolvê-la.
- 2) A expressão encontrada para os valores permitidos de energia foi exatamente a mesma proposta por Bohr (equação 8), com a constante de Rydberg também idêntica à encontrada por Bohr. Isso significa que o espectro de raios do Hidrogênio ganhou uma descrição clara e precisa no contexto da nova teoria, com os números resultando de meros cálculos, sem necessidade de qualquer hipótese prévia a seu respeito.
- 3) Sendo coincidente com os resultados de Bohr, os resultados de Schrödinger, evidentemente, satisfazem ao princípio da correspondência, mas também de maneira natu-

ral, sem a necessidade de impô-lo como condição. A presença da constante de Planck  $h$  estabelece que seus resultados referem-se estritamente ao mundo microscópico, sendo redundante a sua aplicação aos sistemas macroscópicos com os quais interagimos quotidianamente.

- 4) A Equação de Schrödinger não permite calcular, com exatidão, a trajetória percorrida pelo elétron em torno do núcleo. O mais que ela pode fornecer é a probabilidade de o elétron estar aqui ou acolá. Os livros didáticos costumam representar pictoricamente este resultado por meio de figuras, nas quais o núcleo aparece como um ponto central rodeado de manchas mais escuras ou mais claras, indicando as regiões onde é mais ou menos provável encontrar-se o elétron. Na teoria de Schrödinger, o elétron é descrito como uma “partícula” de ínfimas dimensões, dotada de massa e de carga elétrica e de localização imprecisa, indefinida. Esta é a nova visão que substitui a paradoxal dualidade onda-partícula, aceita (a contragosto!) durante a fase pré-histórica.

Comparemos este quadro com o apresentado pela antiga Mecânica Quântica, descrito na seção anterior. Fica claro que, com a nova Mecânica Quântica de Schrödinger, a Física Quântica encontrou a linguagem adequada para sua expressão e desenvolvimento, qual seja, a Matemática, que, de resto, é a linguagem natural e adequada para a Física, de um modo geral<sup>9</sup>. Eis porque, guardadas as proporções, podemos traçar um paralelo entre o significado do surgimento da Equação de Schrödinger para a Física Quântica e a descoberta da escrita para a humanidade.

Embora a equação de Schrödinger sirva para descrever a dinâmica de uma única partícula, artifícios de cálculo, que permitem aplicá-la ao caso de átomos complexos, foram desenvolvidos. Com o avanço dos recursos computacionais, foi possível calcular, com precisão e riqueza de detalhes, a estrutura eletrônica dos átomos de qualquer elemento químico, explicando seu espectro de raios, suas propriedades físicas e até mesmo seu comportamento químico. A tabela periódica dos elementos ficou inteiramente explicada e não seria exagero dizermos que a Química encontrou seus fundamentos nas leis da Física.

A Equação de Schrödinger levou a previsões notáveis a respeito do comportamento dos sistemas microscópicos, todas elas comprovadas em experimentos posteriores. Mencionaremos, de passagem, apenas duas, talvez as de maior impacto. Com relação aos osciladores físicos, deduziu-se que sua menor energia de oscilação não pode ser zero, conforme

---

9 A bem da verdade, diga-se que Heisenberg propôs, simultaneamente, a Schrödinger, outra versão formal inteiramente equivalente para a Mecânica Quântica, mas que só foi assimilada mais tarde.

postulara Planck, mas existe um valor mínimo admissível, que é denominado de “energia de ponto zero”. Em outras palavras, um oscilador físico jamais alcançará o repouso. A outra previsão refere-se ao chamado “efeito túnel”, que é como se denomina a possibilidade de uma partícula confinada escapar ao confinamento como se encontrasse um túnel nas “paredes” do sistema. Duas importantes aplicações deste efeito são a explicação da radioatividade alfa e a construção dos modernos microscópios de tunelamento.

## 15 O presente e o futuro

Apesar de todo esse sucesso, a Mecânica Quântica de Schrödinger representa apenas o início de um processo. Outros passos foram necessários até tornar-se uma teoria mais geral e abrangente, passando a merecer a denominação de Física Quântica. Em primeiro lugar, a equação de Schrödinger aplica-se apenas a partículas que se movem em baixas velocidades. Uma versão que contempla situações relativísticas (isto é, adaptada para grandes velocidades) foi, de imediato, desenvolvida por Dirac e foi fundamental para a descrição precisa da estrutura atômica. Para o tratamento de sistemas envolvendo um grande número de partículas, criaram-se as teorias estatísticas quânticas, em contrapartida à Mecânica Estatística Clássica. Mas essas teorias aplicam-se apenas a partículas materiais, não servem para descrever a dinâmica dos fótons, uma vez que a estes não se pode atribuir um valor para a massa. Então, para descrever a quantização do campo eletromagnético, surgiu a Teoria Quântica de Campos. Eletrodinâmica Quântica, Ótica Quântica, Cromodinâmica Quântica são extensões da teoria, apropriadas à descrição de determinadas categorias de fenômenos físicos. A cada passo, a linguagem e os recursos matemáticos tornam-se mais complexos e mais difícil se torna levar ao leigo uma informação fidedigna e consistente.

Mas houve também tropeços. A Física Quântica não mostrou a mesma adequação para a descrição dos processos nucleares. De certa forma, os problemas relativos ao núcleo atômico foram superados sem serem resolvidos, pois a discussão deslocou-se para uma escala ainda mais diminuta, a do mundo das partículas elementares, mundo este que ainda hoje carece de uma teoria que o represente de maneira satisfatória. Atualmente, os físicos trabalham na busca de uma teoria capaz de fornecer uma descrição unificada de todas as forças da natureza, que são classificadas em quatro tipos: as forças gravitacionais, as forças eletromagnéticas, as forças fortes ou nucleares e as forças fracas. Tal teoria, hoje ainda especulativa, é desenvolvida em linguagem matemática altamente sofisticada e designada pelas siglas GUT (Grand Unified Theory) ou TOE (Theory

of Everithing). A teoria do *big bang*, por exemplo, pode ser descrita como “os últimos avanços teóricos levados às últimas conseqüências”. As descrições que desta teoria têm sido feitas a título de divulgação científica não passam de arremedos, pois, pelas complexidades matemáticas que envolve, seria extremamente difícil torná-la compreensível aos leigos. Além do mais, é prematuro divulgá-la, pois a explicação que ela fornece sobre as origens do Universo está longe de ser unanimemente aceita, mesmo no estrito círculo dos especialistas. As razões pelas quais físicos de prestígio assumem o risco e a responsabilidade por tais iniciativas de popularização constituem, de fato, um verdadeiro mistério.

## 16 Mecânica Quântica de Schrödinger × Mecânica de Newton

Na intenção de iniciar uma discussão sobre o conteúdo essencial da Física Quântica, vamos nos restringir, agora, à sua versão mais simples, que é também a mais limitada: a Mecânica Quântica de Schrödinger. Conforme já foi dito, esta teoria descreve o comportamento de uma única partícula em interação com o meio exterior e está inteiramente contida na Equação de Schrödinger (equação 12).

Para saber como se comporta uma certa partícula sob a ação de algum agente externo, o procedimento é, em princípio, muito simples: basta resolver a sua equação de Schrödinger. Hoje, é possível programar um computador para cumprir essa tarefa. Tudo o que precisamos fazer é alimentá-lo com apenas dois dados: a massa  $m$  da partícula e a função  $V$ , que representa a ação externa a que ela está sujeita. O computador fornecerá, então, a solução do problema, representada pela função de estado  $\square$ .

A função de estado  $\square$  contém toda a informação que é possível obter-se sobre o comportamento da partícula. No caso de um átomo, conforme já expusemos, é possível calcular, com absoluta precisão, as energias dos vários estados estacionários permitidos aos elétrons. Mas, quanto à posição de cada elétron num dado momento, só o que se pode extrair de  $\square$  é a “probabilidade” de encontrá-lo em um dado ponto em um dado instante.

Um resultado frustrante, se contrastado com o que nos oferece a mecânica de Newton. Esta nos permite, por exemplo, prever com absoluta precisão onde estará um certo corpo celeste do sistema solar em um dado instante futuro, ou dizer onde esteve em qualquer momento no passado. É assim que os astrônomos podem fazer previsões espantosamente corretas sobre a ocorrência de eclipses ou interpretar relatos sobre efemérides astronômicas encontrados em documentos antigos. Já da Mecânica Quântica, com relação à posição de um elétron nas vizinhanças do núcleo atômico, o máximo de informação que podemos extrair é a probabilidade de ele estar aqui ou acolá...

Por que, então, não usamos a Mecânica de Newton no estudo dos átomos? Ora, porque as previsões que ela faz sobre a localização dos elétrons, a sua energia, ou qualquer outra variável dinâmica que caracterize o seu comportamento, simplesmente dão errado. No mundo macroscópico, vemos os objetos com nossos olhos e seu movimento futuro é perfeitamente previsível. A Mecânica Clássica descreve adequadamente o comportamento dos objetos macroscópicos, tal como eles aparecem aos nossos olhos ou sob a mira de nossos instrumentos. Se Newton houvesse criado uma mecânica incapaz de ajustar-se a esta realidade, capaz apenas de indicar a probabilidade de, digamos, o sol nascer amanhã um pouco mais tarde ou mais cedo, ou de a próxima lua cheia acontecer daqui a três ou cinco semanas, certamente tal mecânica não haveria sido aceita. Já os elétrons, não podemos vê-los, nem dispomos de qualquer instrumento capaz de localizá-los com precisão. De que nos serviria, então, calcular a sua exata posição em um dado instante? Como a equação de Schrödinger permite calcular corretamente as energias dos estados estacionários e explicar as cores presentes nos espectros de raios dos elementos, que é o que vemos dos átomos, é ela, então, a teoria adequada para a descrição dos sistemas atômicos.

## 17 Duas visões da natureza

Na seção anterior, mencionamos uma circunstância a respeito das teorias físicas raramente evidenciada ou discutida, mesmo nos cursos de Física: tais teorias são construídas com o propósito de descrever o comportamento dos sistemas físicos dos quais se ocupam, da forma como os percebemos ou observamos, e sua validade é medida por sua adequação a tal propósito; o confronto com a experiência é o critério definitivo para a sua aceitação ou rejeição. Assim, a Mecânica de Newton é uma teoria adequada para descrever os processos dinâmicos que ocorrem no mundo macroscópico e que não envolvem velocidades muito elevadas, e a tais processos dinâmicos restringe-se o seu domínio de validade. Quanto à Mecânica Quântica, mesmo sem fornecer informação precisa sobre a localização das partículas elementares, dá-nos conta perfeitamente dos processos dinâmicos que elas protagonizam, permitindo-nos explicar as sensações que nos produzem ou as indicações de nossos instrumentos de medida a respeito de seu comportamento.

As duas mecânicas, no entanto, oferecem duas concepções inteiramente diferentes acerca da natureza. A Física Clássica descreve um mundo onde os fenômenos naturais ocorrem de maneira determinista. Conhecendo-se as condições atuais de um dado sistema e conhecendo-se as leis que regem o seu comportamento, é possível prever, com precisão, a sua evolu-

ção ou reconstruir o seu passado. A cada causa segue-se um efeito bem determinado. Isso corresponde ao senso comum, concorda com a maneira como percebemos os fatos naturais em nosso dia-a-dia; as leis da Física Clássica nada mais fazem do que descrever esta nossa realidade. Já as leis da Física Quântica descrevem uma outra natureza, ajustam-se a uma outra realidade, na qual dois sistemas físicos idênticos, sob idênticas condições, provavelmente não evoluirão da mesma forma, sendo impossível prever o exato curso de cada um. Em outras palavras, a Física Quântica, descreve uma natureza em que os fenômenos naturais seguem um curso aleatório, probabilístico. Mas, como será de fato a natureza?

Lembremos que os idealizadores da Física Quântica impuseram-lhe, desde o início, a condição de que obedecesse ao já mencionado princípio da correspondência, isso é, exigiram que a sua nova teoria, quando aplicada a velhos problemas já resolvidos pela Física Clássica, desse os mesmos resultados, resultados esses, aliás, já consagrados em virtude de sua plena concordância com os fatos experimentais. Assim, no contexto da Física Quântica, o aparente curso determinístico dos fenômenos no mundo macroscópico reflete a circunstância de que, nesta escala, dentre as múltiplas possibilidades para o curso de um fenômeno, uma delas, justamente aquela que estamos acostumados a presenciar, é privilegiada em relação às demais por ser, de longe, a mais provável; nada impede, no entanto, ao menos em princípio, que, em raríssimas ocasiões, algo inusitado ou surpreendente possa acontecer. A Newton, evidentemente, não poderia ocorrer semelhante circunstância, pois sequer conhecia os fatos com os quais se defrontariam os físicos na virada do século XIX, havendo a sua Mecânica resultado, portanto, em uma teoria de âmbito limitado, adequada apenas aos sistemas macroscópicos e situações que não envolvem grandes velocidades. Então, repetindo o que já foi dito no penúltimo parágrafo da sessão 7, a Mecânica Quântica, por abranger a Mecânica Clássica e ir além dela, é considerada mais adequada, mais completa, mais “verdadeira”, do ponto de vista da Física. Seria nossa percepção de uma natureza determinista uma mera ilusão, apenas o resultado de nossa maneira imperfeita de ver e interpretar os fenômenos naturais?

Essa não seria uma situação nova na história da ciência. Aristóteles, baseado em suas observações e em sua experiência diária, formulou o princípio de que um objeto somente executa um movimento (que não lhe seja natural) enquanto estiver sob a ação de um agente motor; cessada a ação deste agente, o objeto pára. Foram necessários dezoito séculos até que Galileu propusesse o princípio da inércia, segundo o qual um objeto não necessita de agente externo algum que sustente o seu movimento, mostrando, assim, que Aristóteles se deixara iludir pelas

aparências, fora enganado pelos sentidos. A força dos dados sensoriais, das vivências do cotidiano é tanta que, ainda hoje, quem não estudou Física geralmente ainda interpreta a tendência dos objetos ao repouso à maneira de Aristóteles. Da mesma forma, é muito difícil aceitar-se que seja da essência da natureza o comportamento errático, probabilístico dos fenômenos naturais. Esta nova dificuldade, no entanto, não afeta apenas aos que não estudaram física, mas dividiu as opiniões dos próprios criadores da Física Quântica e ainda hoje é motivo de discussão.

## 18 O Princípio da Incerteza e o Princípio da Complementaridade

Os físicos da chamada Escola de Copenhague, liderados por Bohr, aceitaram, com naturalidade, a nova concepção. Interpretaram o caráter probabilístico das previsões da Mecânica Quântica como a contrapartida teórica das dificuldades inerentes aos processos de medida das propriedades dos sistemas físicos (sub)microscópicos.

Um exemplo pode ajudar a compreender a situação. Nas estradas, os “pardais” realizam, com grande eficiência, a tarefa de obter simultaneamente a posição e a velocidade dos automóveis, o que é possível com o auxílio de ondas eletromagnéticas: um radar envia, na direção do automóvel, um feixe de microondas que, uma vez refletido por ele, traz de volta ao equipamento a informação sobre a sua velocidade; no mesmo instante, um *flash* ilumina o automóvel para que possa ser fotografado, sendo, então, a sua posição precisamente determinada na foto. Imaginemos o mesmo procedimento tendo como objeto um elétron. Suponhamos que queiramos saber, num dado momento, a exata posição e a velocidade de um elétron que vem em nossa direção. Sendo o elétron um ente microscópico, recebe as ondas luminosas que lhe enviamos como uma rajada de fótons, ou seja, partículas que, chocando-se contra ele, desviam-no de sua trajetória, alteram a sua velocidade. O que poderão dizer tais fótons, uma vez de volta ao equipamento, sobre a antiga velocidade do elétron ou sobre o novo rumo que ele tomou?

O importante, no exemplo acima, é compreender que a impossibilidade de obter informações precisas sobre o elétron não é de ordem meramente prática, tal que possa ser superada mediante aperfeiçoamento dos métodos ou instrumentos. Trata-se de uma dificuldade essencial, inerente à escala do mundo microscópico, impossível de ser transposta. Para obter informações sobre um elétron, necessitamos da intermediação de um fóton; mas um fóton jamais poderá “ler” um elétron sem com ele interagir, sem alterar as suas condições, o seu estado. Nós, seres do mundo macroscópico, devemos nos conformar com esta limitação intransponível: não nos é dado contemplar o mundo microscópico como meros espectadores, sem nele interferir,

sem alterá-lo. O que vemos ao perscrutá-lo já é o resultado desta interação; talvez valha aqui a metáfora do elefante na loja de cristais... E, no afã de encontrar uma teoria capaz de se ajustar às evidências experimentais que se iam acumulando, os físicos acabaram por construir uma teoria que não apenas explica o comportamento dos entes microscópicos em suas manifestações espontâneas, mas também descreve a maneira como eles reagem, quando em interação conosco. Chega a ser quase obrigatório admitirmos que a resposta do mundo microscópico a essas nossas intervenções invasivas só possa ser descrita em termos de probabilidades, uma vez que o cálculo das probabilidades é o recurso matemático adequado para a descrição de fenômenos aleatórios. Em termos práticos, o que precisávamos era de uma teoria que se ajustasse a essas circunstâncias todas, que descrevesse os resultados dessas interações, que explicasse as leituras de nossos instrumentos de medida; a Mecânica Quântica cumpriu bem essa função, daí o seu sucesso.

O Princípio da Incerteza de Heisenberg e o Princípio da Complementaridade de Bohr foram construídos nessa concepção. Representam tentativas de interpretar o caráter probabilístico da nova teoria como resultado da impossibilidade de conseguirmos informações precisas sobre o mundo microscópico, tal como as obtemos sobre o mundo macroscópico. O primeiro afirma que existem pares de grandezas dinâmicas que não podem ser medidas simultaneamente com qualquer precisão arbitrária. A posição e a velocidade de uma partícula são um bom exemplo. Quanto ao segundo, já nos referimos a ele na Introdução; discuti-lo com mais profundidade seria tarefa por demais complexa para este trabalho. São, essencialmente, versões equivalentes da mesma idéia fundamental.

Mas, mesmo no grupo de Bohr, aprofundavam-se as discussões. O famoso paradoxo conhecido como “o gato de Schrödinger” mostra que o próprio criador da mais famosa equação da Física Quântica apontava contradições na interpretação probabilística atribuída ao formalismo da nova teoria. A esta altura, no entanto, a teoria já avançara muito, e a proposta do paradoxo já se deu em um contexto diferente do até aqui apresentado, razão pela qual não o discutiremos agora.

## 19. Einstein e a Física Quântica

Albert Einstein contribuiu para o desenvolvimento da Física Quântica desde a primeira hora, mas a relevância de sua contribuição raramente é posta em evidência, em virtude de haver sido ofuscada por seu legado maior, a Teoria da Relatividade. Esquecemos, com frequência, que o Prêmio Nobel lhe foi concedido, principalmente, por haver proposto a quantização do campo eletromagnético e, com base nela, haver explicado o

efeito fotoelétrico (ver seção 8). Também já mencionamos que, em 1917, quando o interesse geral era atraído pelas propriedades dinâmicas das partículas subatômicas, Einstein “corria por fora”, mais interessado na quantização dos campos eletromagnéticos, o que o credencia como um autêntico precursor da moderna Teoria Quântica de Campos (ver nota de rodapé nº 7). O trabalho, que publicou naquele ano, contém, em seu bojo, a indicação teórica sobre a viabilidade de construir-se um amplificador de luz, o que, de fato, veio a ser realizado na década de cinquenta, resultando no equipamento hoje conhecido como *laser*.

Mas Einstein foi, paradoxalmente, um crítico implacável da teoria quântica. O seu descontentamento talvez possa ser sintetizado da seguinte forma: ele não compactuava com o conformismo da Escola de Copenhague. É certo que, por meio de experimentos, não podemos acessar o mundo microscópico sem nele interferir; não podemos, portanto, por esta via, obter informação precisa sobre seus constituintes e seu comportamento. Mas a teoria tem obrigação de ir além, os físicos devem ser capazes de, pela força do intelecto, compreender as profundezas da matéria. Em 1935, Einstein juntou-se a Podolsky e Rosen para formular o famoso paradoxo (ou argumento) EPR, mediante o qual pretenderam demonstrar a precariedade da Mecânica Quântica e a inadequação da concepção probabilística da natureza, que vem embutida em se arcabouço teórico.

Por suas concepções filosóficas, Einstein pode ser considerado um realista. Atribuía à natureza uma realidade objetiva, realidade esta que o homem procura conhecer e compreender através da ciência. Quanto mais evoluir a ciência, mais próxima da realidade da natureza será a descrição que dela fazem os cientistas. Era, também, um homem profundamente religioso: professava uma religião que ele próprio qualificava como transcendental. Não é difícil entender o seu realismo filosófico como compatível com esta concepção transcendental a respeito de Deus e do universo. Tal concepção, no entanto, não admitiria a idéia de uma natureza que se comportasse aleatoriamente, cujas leis não impusessem aos fenômenos um curso predeterminado, uma finalidade. Ou seja, a descrição quântica do mundo microscópico não poderia corresponder à verdade da natureza. “Deus não joga dados” foi a frase que cunhou para expressar esta convicção e que se tornou famosa.

## 20 Conclusão

Os posicionamentos filosóficos diante do formalismo da Física Quântica não se limitam à controvérsia entre o pragmatismo da Escola de Copenhague e o realismo de Einstein. Há lugar para todas as tendências, do solipsismo ao positivismo, passando por uma esdrúxula sugestão sobre a possibilidade de o universo sub-

dividir-se continuamente em universos paralelos, idênticos em tudo, exceto por alguma característica particular (por exemplo, o gato de Schrödinger estar vivo em um deles e morto no outro...). Não obstante, a Física Quântica é um sucesso como teoria científica, na medida em que descreve adequadamente o mundo microscópico e nossas relações com ele, a ponto de permitir ao homem um domínio fantástico sobre os fenômenos físicos nessa escala diminuta. O imenso impacto tecnológico, sofrido pela civilização nas últimas décadas, é consequência direta desse domínio.

Ressaltemos, à guisa de conclusão, alguns aspectos:

1. As teorias da Física só atingem a maturidade, quando expressas em linguagem matemática. Conforme expusemos na seção 14 e nota de rodapé número 8, a fase madura da Física Quântica iniciou quando Schrödinger e Heisenberg desenvolveram suas teorias formais. Mas a Matemática é, para a Física, muito mais do que mera linguagem: é mediante o uso de procedimentos da álgebra e do cálculo avançado que se vão relacionando os conceitos, princípios e leis, de modo a extrair conclusões. Ao desenvolver uma teoria, “o físico não argumenta, calcula”!

2. A Física Quântica é a teoria que descreve os processos físicos no mundo microscópico (e submicroscópico). A constante de Planck  $h$  está presente em *todas* as equações da Física Quântica, sem exceção; o seu valor extremamente pequeno estabelece que os efeitos quânticos somente são significativos naquele mundo de escala também extremamente pequena (ver seção 7). Se usarmos a Física Quântica na descrição de um fenômeno em escala macroscópica, os aspectos quânticos serão ofuscados pela magnitude dos aspectos não-quânticos, e a descrição obtida será idêntica à dada pela Física Clássica (princípio da correspondência).

3. A busca de efeitos genuinamente quânticos em escala macroscópica constitui-se em tema de pesquisa atual. Como tema de pesquisa, é válido. Nenhum resultado positivo, no entanto, foi até hoje relatado.

4. Vemos, com freqüência, conceitos, princípios e procedimentos da Física Quântica aplicados a processos não-físicos (economia, direito, psicologia, relações interpessoais, saúde...), a sistemas macroscópicos (de escala incompatível com o valor da constante de Planck), sem a precisão de linguagem e sem o rigorismo lógico-formal da Matemática. Podemos admitir que pessoas façam uma extensão livre da Física Quântica, assim como alguém faz uma releitura livre de um texto ou uma interpretação livre de uma obra de arte. Mas o que elas estão fazendo já não é mais Física Quântica. Algumas, no entanto, com ou sem formação em Física, insistem, mesmo quando advertidas, em qualificar sua ação como tal. Seria ótimo se tais pessoas estudassem mais Física Quântica, ou revisassem o seu enfoque, ou, até mesmo, reavaliassem suas intenções.

O tema deste caderno foi apresentado no  
IHU Idéias, dia 07/08/03.

## TEMAS DOS CADERNOS IHU IDÉIAS

- N. 01 – *A teoria da justiça de John Rawls* – Dr. José Nedel.
- N. 02 – *O feminismo ou os feminismos: Uma leitura das produções teóricas* – Dra. Edla Eggert.  
*O Serviço Social junto ao Fórum de Mulheres em São Leopoldo* – MS Clair Ribeiro Ziebell e Acadêmicas Anemarie Kirsch Deutrich e Magali Beatriz Strauss.
- N. 03 – *O programa Linha Direta: a sociedade segundo a TV Globo* – Jornalista Sonia Montaña.
- N. 04 – *Ernani M. Fiori – Uma Filosofia da Educação Popular* – Prof. Dr. Luiz Gilberto Kronbauer.
- N. 05 – *O ruído de guerra e o silêncio de Deus* – Dr. Manfred Zeuch.
- N. 06 – *BRASIL: Entre a Identidade Vazia e a Construção do Novo* – Prof. Dr. Renato Janine Ribeiro.
- N. 07 – *Mundos televisivos e sentidos identitários na TV* – Profa. Dra. Suzana Kilpp.
- N. 08 – *Simões Lopes Neto e a Invenção do Gaúcho* – Profa. Dra. Márcia Lopes Duarte.
- N. 09 – *Oligopólios midiáticos: a televisão contemporânea e as barreiras à entrada* – Prof. Dr. Valério Cruz Brittos.
- N. 10 – *Futebol, mídia e sociedade no Brasil: reflexões a partir de um jogo* – Prof. Dr. Édison Luis Gastaldo.
- N. 11 – *Os 100 anos de Theodor Adorno e a Filosofia depois de Auschwitz* – Profa. Dra. Márcia Tiburi.
- N. 12 – *A domesticação do exótico* – Profa. Dra. Paula Caleffi.
- N. 13 – *Pomeranas parceiras no caminho da roça: um jeito de fazer Igreja, Teologia e Educação Popular* – Profa. Dra. Edla Eggert.
- N. 14 *Júlio de Castilhos e Borges de Medeiros: a prática política no RS* – Prof. Dr. Gunter Axt

- N. 15 – *Medicina social: um instrumento para denúncia* – Profa. Dra. Stela Nazareth Meneghel.
- N. 16 – *Mudanças de significado da tatuagem contemporânea* – Profa. Dra. Débora Krischke Leitão.
- N. 17 – *As sete mulheres e as negras sem rosto: ficção, história e trivialidade* – Prof. Dr. Mário Maestri.
- N. 18 – *Um itinerário do pensamento de Edgar Morin* – Profa. Dra. Maria da Conceição de Almeida.
- N. 19 *Os donos do Poder, de Raymundo Faoro* – Profa. Dra. Helga Iracema Ladgraf Piccolo.
- N. 20 *Sobre técnica e humanismo* – Prof. Dr. Oswaldo Giacóia Junior.
- N. 21 *Construindo novos caminhos para a intervenção social* – Profa. Dra. Lucilda Selli.