

**FÍSICA E FILOSOFIA: UMA APROXIMAÇÃO ATRAVÉS DE UM TEXTO
NA DISCIPLINA ESTRUTURA DA MATÉRIA⁺**
(Physics and philosophy: a greater approximation through a text in the structure of matter
college subject)

Luiz O.Q. Peduzzi

Departamento de Física / PPG em Educação Científica e Tecnológica
Universidade Federal de Santa Catarina
88040-900 - Florianópolis, SC, Brasil
peduzzi@fsc.ufsc.br

Resumo

Este trabalho apresenta os primeiros resultados de uma pesquisa que tem por objetivo estabelecer uma maior aproximação entre a física e a filosofia da ciência na abordagem de conteúdos relativos à disciplina Estrutura da Matéria I, do Curso de Física da Universidade Federal de Santa Catarina. O texto “Tópicos de física moderna: introdução à mecânica quântica”, dividido em sete capítulos e compreendendo 167 páginas, representa o produto do estágio atual dessa pesquisa. Uma avaliação preliminar desse material instrucional, em termos de sua receptividade junto a alunos que cursaram essa disciplina no semestre 02 de 2001, apresenta resultados bastante satisfatórios e indicativos relevantes para o seu aperfeiçoamento e ampliação, através de novos estudos.

Palavras-chave: estrutura da matéria; filosofia da ciência; ensino de Física

Summary

This article presents the first results of a study whose aim is to establish a greater approximation between physics and the philosophy of science in the subject ‘Structure of Matter I’, part of the physics course at the Federal University of Santa Catarina. The outcome of the study is now represented by the text ‘Topics in modern physics: introduction to quantum mechanics’, divided in seven chapters and comprising 167 pages. A preliminary evaluation of this teaching material, in terms of its reception by students following the subject in the second semester of 2001, offers very satisfactory results and relevant indicators for its improvement and expansion through further studies.

Keywords: structure of matter; philosophy of science; physics teaching

Introdução

Resultados de grande impacto na ciência, como os estabelecidos pela teoria da evolução das espécies, de Charles Darwin (1809-1882), pela teoria da relatividade, pela mecânica quântica, produzem alterações profundas no modo de viver e de pensar não apenas do cientista, mas também das pessoas em geral.

No âmbito da própria ciência, e no campo da física, a relatividade da simultaneidade, a constância da velocidade da luz, o princípio da incerteza, as propriedades corpusculares da radiação e ondulatórias da matéria, levaram cientistas como Albert Einstein (1879-1955), Niels Bohr (1885-

⁺ Trabalho apresentado oralmente no *I Encuentro Iberoamericano de Investigación en Educación en Ciencias*, Burgos, España, 18 a 21 de setembro 2002

1962), Werner Heisenberg (1901-1976), Louis de Broglie (1892-1962), Erwin Schrödinger (1887-1961), Max Born (1882-1970), à reflexão intensa, não apenas sobre o papel conferido aos novos conceitos, mas sobre a natureza do conhecimento científico e, em muitos casos, sobre as relações entre o sujeito e o objeto do conhecimento.

Este quadro se altera bastante a partir da década de 50, quando o interesse dos cientistas se volta, essencialmente, para o produto do conhecimento. A Segunda Guerra Mundial e os efeitos do pós-guerra (guerra fria entre Estados Unidos e a antiga União Soviética) forçam o delineamento de novas políticas governamentais de fomento à pesquisa, que visam estreitar as relações entre ciência e tecnologia. Essas ações apresentam reflexos imediatos para a educação científica, que deve formar profissionais de perfil compatível com as novas demandas.

Além desse forte condicionante externo sobre o ensino da ciência e da física, em particular, também não se pode descartar a possível influência de um outro importante fator, desta feita de ordem interna à ciência: o da tendência das novas teorias (relatividade e mecânica quântica) passarem a ser vistas por pesquisadores, professores e autores de livros didáticos como estruturas conceituais definitivas.⁽¹⁾

A linearidade com que usualmente os conteúdos de física são veiculados pelos livros didáticos confere uma ênfase quase que exclusiva aos produtos do conhecimento científico, ignorando os processos de sua construção. Nessa perspectiva, a mecânica quântica é apresentada ao estudante como uma estrutura consensual, acabada, não problemática, dentro de uma 'seqüência natural' de desenvolvimento da física.

Contudo, a descontextualização histórica das teorias fragmenta o conhecimento científico, tornando qualquer seqüência didática artificial. A falsa idéia de que o último elo da cadeia parece sempre irrevogável é decorrência imediata.

O resultado desse processo, combinado com o fato de que há uma grande abstração inerente aos conceitos da física quântica, notadamente, termina por conferir ao ensino dessa teoria, e também da relatividade, um enfoque iminentemente matemático, centrado na resolução de problemas. Um ensino com essa orientação parece ser bastante compatível com a crença amplamente disseminada no meio acadêmico de que o formalismo matemático esgota em si toda a essência do conhecimento.

De fato, na apresentação e avaliação crítica de teorias, os cientistas, em geral, e os professores, em particular, discutem a eficácia que demonstram em corroborar ou refutar hipóteses, em derivar conseqüências, em prever novos fenômenos... Aspectos com alto grau de subjetividade, como os relativos à simplicidade lógica, perfeição interna, estética matemática, são também considerados. Desde Galileu Galilei (1564-1642), fica claro que o livro da natureza, 'que continuamente se abre a nossos olhos', está escrito em caracteres matemáticos e que sem o seu conhecimento 'vamos perdidos dentro de um obscuro labirinto'.⁽²⁾ A matemática é importante, vital, mas não é tudo.

Dialogando com Wolfgang Pauli (1900-1958) sobre possíveis dificuldades no entendimento da teoria da relatividade, o jovem Heisenberg ressalta que o arcabouço matemático da teoria não lhe causava nenhum problema, mas que ele ainda não se sentia inteiramente à vontade com o desconcertante papel atribuído por Einstein ao tempo, que na nova mecânica não mais detém o caráter de grandeza absoluta da física clássica. Como ele mesmo afirma, "*talvez você possa até dizer que aprendi a teoria com o cérebro, mas não ainda com o coração*".⁽³⁾

Em termos internos à ciência, conceitos, princípios de conservação, postulados, imagens, analogias, considerações de simetria, hipóteses (testáveis), concepções filosóficas, o instrumental e as técnicas teóricas e experimentais compõem um quadro sutil, amplo e complexo de elementos que orientam a estruturação e interpretação de teorias, cuja articulação com o fato experimental é o produto que se almeja.

Assim, nos primeiros ‘estágios’ da relatividade, Einstein não centra seu pensamento na matemática, mas na força de certas imagens das quais emergem conceitos fundamentais de sua teoria⁽⁴⁾.+ Paradoxalmente, as analogias e importações de imagens do mundo clássico para o universo atômico mostram-se problemáticas e com frequência inadequadas.

É importante ressaltar que é a partir de uma intuição pura e simples que Louis de Broglie, considerando que a simetria se constitui em um dos aspectos fundamentais da natureza, atribui à matéria propriedades ondulatórias, confirmadas posteriormente a partir de experimentos de difração de elétrons. O que se sabia, até então, era que as ondas eletromagnéticas apresentavam propriedades corpusculares, como mostravam os efeitos fotoelétrico e Compton.

Para o físico David Bohm (1917-1992)⁽⁵⁾, responsável por uma das interpretações da mecânica quântica, o cientista pouco reflete sobre a sua ciência, parecendo estar mais preocupado em ‘produzir fórmulas que predigam corretamente os resultados das experiências’ do que em examinar o inevitável embricamento da sua ciência com aspectos filosóficos.

Uma formação calcada em uma única visão do trabalho científico parece explicar o marcante predomínio da concepção empirista-indutivista da ciência entre pesquisadores e professores. Há, no entanto, pouca justificativa para isso, em função dos notáveis trabalhos de Gaston Bachelard (1884-1962)⁽⁶⁾, Karl R. Popper (1902-1994)⁽⁷⁾, Thomas S. Kuhn (1922-1996)⁽⁸⁾, Imre Lakatos (1922-1974)⁽⁹⁾, Paul Feyerabend (1924-1994)⁽¹⁰⁾, N. Russel Hanson (1924-)⁽¹¹⁾, na área da filosofia da ciência.

Neste artigo, apresenta-se os primeiros resultados de uma pesquisa que tem por objetivo estabelecer uma maior aproximação entre a física e a filosofia da ciência na abordagem de conteúdos relativos à disciplina Estrutura da Matéria I, do terceiro ano do curso de Física da Universidade Federal de Santa Catarina. A primeira versão do texto “Tópicos de física moderna: introdução à mecânica quântica”, centrado na fase de estruturação da mecânica quântica, descrito a seguir, representa o produto dessa pesquisa, em seu estágio atual.

Sobre a estrutura do material instrucional

O texto “Tópicos de física moderna: introdução à mecânica quântica” aborda conteúdos divididos em sete capítulos, compreendendo 167 páginas. Uma introdução, com críticas à concepção empirista-indutivista da ciência e pontuando temas que serão desenvolvidos ao longo do texto, encaminha à leitura dos primeiros capítulos. A composição desse material instrucional, por capítulo e seção, é a seguinte:

I Introdução

Introdução. Referências Bibliográficas.

⁺ Em uma de suas experiências de pensamento, Einstein considera um observador, com velocidade c , perseguindo um raio luminoso.

1. As raízes históricas da física atômica

Introdução. A substância e a forma na composição de todas as coisas. O atomismo de Demócrito. As formas geométricas de Platão. A retomada do atomismo a partir do século XVII. Do flogístico ao átomo de Dalton. Referências Bibliográficas.

2. A estrutura interna do átomo e os primeiros modelos atômicos

Introdução. A descoberta do elétron. A experiência de Millikan. Os raios X. Sistemas saturnianos. O modelo do pudim de passas, de J.J. Thomson. O modelo atômico de Rutherford. O relacionamento teoria-problema. Referências Bibliográficas.

3. O quantum de radiação

Introdução. A radiação de corpo negro. A lei da radiação de Planck. O relacionamento teoria-problema. O efeito fotoelétrico. O relacionamento teoria-problema. O momento de um fóton. O efeito Compton. O relacionamento teoria-problema. Referências Bibliográficas.

4. O átomo de Bohr

Introdução. O problema de Bohr. Espectros atômicos. A quantização das órbitas e das velocidades em sistemas de um elétron. A quantização da energia. Correção para massa nuclear finita. A teoria de Bohr e os espectros atômicos. O relacionamento teoria-problema. O princípio da correspondência. Referências Bibliográficas

5. Ondas de matéria

Introdução. Ondas de de Broglie. Velocidade de onda e velocidade de grupo de onda. A hipótese de de Broglie e a quantização das órbitas. Experimentos com a dupla fenda: o comportamento ondulatório do elétron. O relacionamento teoria-problema. Referências Bibliográficas.

6. O princípio da incerteza

Introdução. O princípio da incerteza. A difração de elétrons por uma fenda e o princípio da incerteza. O contexto da descoberta: a solução de um problema precedida de uma longa incubação. O relacionamento teoria-problema. Referências Bibliográficas.

7. A mecânica ondulatória de Schrödinger

Introdução. A equação de Schrödinger. Sobre a equação de Schrödinger, a função de onda e suas propriedades. A partícula livre. Partícula em uma caixa unidimensional. O relacionamento teoria-problema. Referências bibliográficas.

Física e filosofia

Desde a introdução, uma das preocupações do texto é a de minimizar a concepção empirista-indutivista da ciência, usualmente disseminada entre estudantes de qualquer nível de estudo (Fig.1).

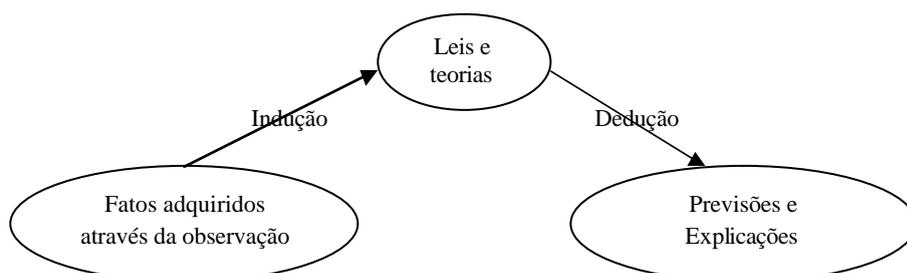


Fig.1 - Síntese do argumento indutivista da ciência.⁽¹²⁾

Desta forma, ao tratar o átomo de Bohr, no capítulo 4, o texto procura deixar claro que o problema de Bohr era o de entender a estabilidade da matéria, “*um perfeito milagre quando considerado do ponto de vista da física clássica*”⁽¹³⁾, e que o seu ‘ponto de partida’ não foram leis empíricas da espectroscopia, mas um conjunto de postulados impondo condições específicas ao modelo atômico de Rutherford. As séries de Balmer e Paschen, conhecidas à época, e outras que a teoria iria prever, vão corroborar as hipóteses de Bohr.

Como enfatiza Lakatos, “*o progresso da ciência teria sido pouco afetado se não tivéssemos os louváveis ensaios e erros do professor suíço: a linha especulativa principal da ciência, continuada pelas especulações ousadas de Planck, Rutherford, Einstein e Bohr teria produzido dedutivamente os resultados de Balmer, como enunciados contrastadores das suas teorias, sem o chamado ‘pioneirismo’ de Balmer... Na realidade, o problema de Bohr não era explicar as séries de Balmer e Paschen, mas explicar a estabilidade paradoxal do átomo de Rutherford*”⁽¹⁴⁾.

A menção a Lakatos, no texto, parece bastante pertinente não apenas quando se enuncia os postulados de Bohr, caracterizando-os como o núcleo duro de seu programa de pesquisa, mas também quando se procura entender o desenvolvimento desse trabalho ‘em um oceano de anomalias’, que H. Margenau expressa tão bem ao dizer que “*o átomo de Bohr se assentava como uma torre barroca sobre a base gótica da eletrodinâmica clássica*”⁽¹⁵⁾.

O desconhecimento do aluno em relação à filosofia da ciência, particularmente quanto aos trabalhos de Bachelard, Popper, Kuhn e Lakatos, mesmo em seus aspectos gerais, não se constitui em obstáculo intransponível à sua compreensão do texto. Contudo, dentro da atual organização dos conteúdos, faz-se, com frequência, indispensável a intervenção do professor para esclarecer e reforçar significados, algumas vezes mais, outras menos intensamente.

Assim, precedendo a apresentação do princípio da correspondência, o texto ressalta que, no domínio de velocidades muito pequenas em relação à velocidade da luz ($v/c \ll 1$) (e de campos gravitacionais fracos), os resultados da mecânica relativística e da mecânica newtoniana são, essencialmente, idênticos. Mas isso não significa, necessariamente, que a mecânica newtoniana seja um caso particular da mecânica relativística. As respostas antagônicas que as filosofias da ciência de Karl Popper e Thomas Kuhn dão a esta questão mostram que o assunto não tem nada de trivial.

Seguido dessas considerações, há uma indicação de leitura suplementar para o aluno⁽¹⁶⁾, de modo a situá-lo em relação a esse tema que provavelmente representa novidade para ele. O professor, como mediador do processo ensino-aprendizagem, pode e deve facilitar esse entendimento, discutindo as implicações das diferentes convicções de Popper e Kuhn sobre o assunto, de modo a ensinar ao aluno a base teórica necessária ao seu posicionamento crítico.

Essa, certamente, é uma condição indispensável para que o estudante compreenda que uma situação análoga ocorre em relação à física atômica (física de Bohr) e a física clássica para números quânticos muito grandes ($n \rightarrow \infty$), onde os resultados proporcionados pelas duas teorias são iguais. De fato, em um domínio em que níveis adjacentes de energia se encontram tão próximos um do outro que, para todos os efeitos, são indistinguíveis, a energia adquire o status de grandeza contínua e não discreta.

Nesse sentido, a física clássica, com suas grandezas contínuas, tende a ser considerada como uma aproximação de uma teoria mais abrangente, de grandezas físicas descontínuas. Quando, contudo, se examina a estrutura conceitual dessas duas teorias, que implicam em visões de mundo inteiramente distintas, já não se pode ter essa mesma certeza sem embasar a resposta em termos de considerações filosóficas.

As incertezas de um conhecimento em fase de elaboração, que utiliza conceitos clássicos para descrever um mundo que não é uma miniatura do universo macroscópico dos fenômenos conhecidos é discutida no capítulo 6, a partir de um diálogo envolvendo Heisenberg e Pauli, centrados na física de Bohr:

Heisenberg: “Para começar, podemos observar a trajetória de um elétron numa câmara de nuvem: ele deixa uma trilha clara de névoa por onde passa. Já que nesse caso existe uma trajetória do elétron, podemos presumir que ela também exista no átomo. Mas tenho algumas reservas quanto a isso. É que embora determinemos a trajetória em si através de métodos newtonianos clássicos, usamos as condições quânticas para explicar a sua estabilidade, assim contrariando abertamente a mecânica newtoniana... Tudo isso me faz pensar que há algo de radicalmente errado em toda essa idéia de órbita de elétrons. Mas qual é a alternativa?”

Pauli: “A coisa toda parece um mito. Se realmente existisse isso de órbita de elétron, é óbvio que o elétron teria de girar periodicamente, com uma dada frequência. Ora, a partir da eletrodinâmica sabemos que quando uma carga elétrica é colocada em movimento periódico ela tem que emitir vibrações elétricas, ou seja, radiar luz dotada de uma frequência característica. Mas não se supõe que isso aconteça com o elétron; ao contrário, dizem que a frequência de vibração da luz emitida situa-se em algum ponto entre a frequência orbital anterior ao misterioso salto e a frequência orbital posterior ao salto. Tudo isso, na verdade, é pura loucura.”⁽¹⁷⁾

Com essa última observação, Pauli toca em um ponto crítico da teoria de Bohr, pois em uma transição do estado n para o estado $n - 1$, no átomo de hidrogênio, a frequência da radiação emitida realmente se situa entre as frequências de revolução destas duas órbitas,

$$\frac{me^4}{8e_0^2 h^3} \frac{2}{n^3} < \frac{me^4}{8e_0^2 h^3} \frac{(2n-1)}{n^2(n-1)^2} < \frac{me^4}{8e_0^2 h^3} \frac{2}{(n-1)^3} ,$$

só ocorrendo a ‘convergência’ para números quânticos muito grandes, de acordo com o princípio da correspondência. Assim, não estaria isto indicando a não existência de órbitas eletrônicas (no sentido clássico) no interior do átomo? Por outro lado, as trajetórias observadas de elétrons em uma câmara de Wilson constituíam um fato experimental concreto.

Essas (e outras) constatações apenas ressaltam que a teoria de Bohr não tem respostas a todas as questões. Seus méritos, contudo, são imensos e ressaltados por Heisenberg: “Acho fascinante a física de Bohr, mesmo com suas dificuldades. Com certeza, Bohr deve saber que está partindo de pressupostos que contém contradições e, por isso, não podem corresponder à realidade. Mas ele tem um instinto infalível e usa esses mesmos pressupostos para construir modelos bastante convincentes dos processos atômicos. Bohr usa a mecânica clássica e a teoria quântica como um pintor usa os pincéis e as cores. Os pincéis não determinam o quadro, e a cor nunca é a realidade completa; mas, se conservar o quadro na mente, o artista pode usar o pincel para transmitir aos outros, não importa de quão inadequada forma, sua imagem mental. Bohr sabe exatamente como se portam os átomos na emissão da luz, nos processos químicos e em muitos outros fenômenos. Isso o ajudou a criar uma imagem intuitiva da estrutura dos diferentes átomos, uma imagem que ele só consegue transmitir aos outros físicos por meios inadequados, como as órbitas dos elétrons e as condições quânticas. Não é certo que ele próprio acredite que os elétrons giram dentro do átomo. Mas está convencido da exatidão de sua imagem. O fato de ele ainda não conseguir expressá-la por meios linguísticos ou técnicas matemáticas adequadas não é um desastre. Ao contrário, aponta para uma tarefa extremamente sedutora.”⁽¹⁸⁾

Durante uma palestra proferida por Bohr, em 1922, e depois em conversa com o próprio Bohr, Heisenberg ratifica estas impressões. A intuição e a inspiração, nem sempre fáceis de

justificar, manifestam-se agudamente nas proposições de Bohr. Elas são ingredientes essenciais, peças integrantes, condições necessárias (mas não suficientes) à estruturação de uma nova física. O processo de construção e desenvolvimento da ciência não abdica das singularidades, mas é coletivo por natureza e demanda tempo à sua elaboração.

A falta de uma linguagem própria para tratar os problemas ao nível atômico é apontada com bastante clareza por Bohr: *“Pretendemos dizer algo sobre a estrutura do átomo, mas falta-nos uma linguagem em que possamos nos fazer entender. Estamos na mesma situação de um marinheiro abandonado numa ilha remota, onde as condições diferem radicalmente de tudo o que ele jamais conheceu e onde, para piorar as coisas, os nativos falam uma língua desconhecida. Ele tem que se fazer entender, mas não dispõe de meios para isso. Nesse tipo de situação, uma teoria não pode ‘esclarecer’ nada, no sentido científico estrito habitual da palavra. Tudo o que ela tem a esperança de fazer é revelar ligações. Quanto ao mais, ficamos Tateando da melhor maneira possível... Fazer mais do que isso está muito além dos recursos atuais.”*⁽¹⁹⁾

A questão da formação de imagens na física que está se estruturando vai se mostrar um outro aspecto de grande importância. E se a abstração for, necessariamente, um ingrediente intrínseco e inseparável dos processos atômicos?

Para Planck, as imagens que os conceitos, leis e teorias que um corpo de conhecimento suscita são imprescindíveis para a sua compreensão e assimilação, pelo estudioso. São elas que propiciam representações ‘palpáveis’ da realidade objetiva.

Paul Dirac (1902-1984) discorda de Planck. Para ele, *“o principal objetivo da ciência física não é proporcionar imagens, mas sim formular as leis que governam os fenômenos e aplicar estas leis para descobrir novos fenômenos”*⁽²⁰⁾

O certo é que a física atômica lida com um mundo novo, onde as analogias com imagens clássicas não comportam nenhuma associação direta, pura e simples.

Os fótons de Einstein (capítulo 3) não têm análogo na mecânica clássica. Com massa de repouso nula e movimentando-se com a velocidade da luz, eles diferem dos corpúsculos newtonianos de luz ou de qualquer outro corpo material. Da mesma forma, não há análogo clássico para o elétron. Nestes termos, um átomo não se assemelha a um modelo em miniatura do sistema solar, pois um elétron não é um corpúsculo esférico ou quase-esférico, também não é uma nuvem em volta do núcleo, não é, enfim, nenhuma coisa que possa ser identificada com algo conhecido⁽²¹⁾.

A compreensão das ondas de matéria de Broglie (capítulo 5) demanda, necessariamente, uma reformulação da imagem clássica que vincula uma onda a um meio elástico em vibração, como as que são produzidas pelo movimento periódico em uma das extremidades de uma longa corda, as que se verificam em certos instrumentos musicais, as que se originam na superfície de um lago sob o impacto de um objeto, e também da que provém do eletromagnetismo, que a associa a campos elétricos e magnéticos oscilantes.

Hábitos psicológicos fortemente arraigados a experiências clássicas usuais tiram do pensamento a flexibilidade necessária à compreensão de novos conceitos. Assim, como propõe Gaston Bachelard (1884-1962), em sua obra *“O novo espírito científico”*⁽²²⁾, ao examinar o dualismo onda-partícula, faz-se com frequência necessário desaprender certas coisas de modo a poder vê-las de uma outra forma, como partes de uma construção erigida em bases conceituais distintas da anterior.

À luz destas idéias, o conceito de choque, no domínio atômico, deve ser entendido sob uma perspectiva diferente da clássica. *“Quando se trata de partículas como os elétrons, a expressão ‘choque’... não implica que haja contato, pela razão de que não é possível fazer uma representação espacial do elétron: é preferível dizer ‘interação’ do que choque, pois faz intervir imagens menos definidas e é menos inexato.”*⁽²³⁾

Conforme alerta Bachelard, a noção de corpúsculo concebido como um pequeno corpo e a de interação corpuscular entendida como o choque de dois corpos, são ‘noções-obstáculo’, contra as quais o novo espírito científico se deve prevenir.⁽²⁴⁾

A física atômica estrutura-se, rapidamente, como um novo paradigma (ou referencial) do conhecimento físico, disseminando idéias que vão abrigar diferentes concepções filosóficas. Nesse contexto, não deve causar surpresas as incompatibilidades que se verificam entre os seus conceitos e os tradicionais, em vias de superação. O princípio da incerteza de Heisenberg é mais um contundente exemplo. A sua apresentação, no capítulo 6, explicita ao aluno a relevância das concepções teóricas sobre o dado observável, e mais um duro golpe à visão empirista da ciência. O texto enfoca esse assunto a partir de um novo diálogo, dessa feita entre Heisenberg e Einstein, ocorrido depois de uma palestra proferida pelo primeiro sobre a nova mecânica quântica, na Universidade de Berlim, em 1926.

Nesta ocasião, Heisenberg estava bastante preocupado com o problema da trajetória de um elétron em uma câmara de nuvem, cuja representação matemática parecia oferecer obstáculos intransponíveis. Einstein diz que gostaria de ouvir mais sobre as razões envolvidas na negativa dessas órbitas. Segundo Heisenberg, o diálogo estabeleceu-se, basicamente, nos seguintes termos.⁽²⁵⁾

“Não podemos observar as órbitas dos elétrons no átomo – devo ter respondido – mas a radiação que um átomo emite durante as descargas permite-nos deduzir as frequências de oscilação de seus elétrons e as amplitudes correspondentes. Afinal, até na física antiga os números de onda e amplitudes podiam ser considerados substitutos das órbitas dos elétrons. Ora, como uma boa teoria deve basear-se em grandezas diretamente observáveis, achei mais apropriado restringir-me a estas, tratando-as, por assim dizer, como representantes das órbitas dos elétrons.”

“Mas o senhor não acredita seriamente – protestou Einstein – que só as grandezas observáveis devem entrar em uma teoria física, não é?”

“Não foi precisamente isso que o senhor fez com a relatividade? – perguntei com certa surpresa. – Afinal, o senhor enfatizou que não se pode falar em tempo absoluto, simplesmente porque o tempo absoluto não é observável; que só as leituras dos relógios, seja no sistema de referência em movimento, seja no sistema em repouso, são importantes para a determinação do tempo.”

“É possível que eu tenha usado este tipo de raciocínio – admitiu Einstein –, mas ele é absurdo, de qualquer maneira. Talvez eu possa expressá-lo de forma mais diplomática, dizendo que é heurísticamente útil ter em mente o que de fato se observou. Mas em princípio, é um grande erro tentar fundamentar uma teoria apenas nas grandezas observáveis. Na realidade, dá-se exatamente o inverso. É a teoria que decide o que podemos observar.”

É a teoria que decide o que observar ... Esta afirmação de Einstein é de grande pertinência, pois a filosofia da ciência dominante à época é o positivismo lógico, cuja base para a análise da ciência é o empirismo clássico e a lógica formal. Com ela, Einstein enfatiza que são os pressupostos teóricos do cientista que determinam o delineamento de qualquer situação experimental, que dão

sentido às observações realizadas e possibilitam a interpretação dos resultados. Não há observação neutra. Todas as observações estão impregnadas de teorias.

Ao recordar, repentinamente, como ele mesmo diz, a conversa com Einstein, Heisenberg percebe que a solução do problema que tanto lhe intrigava estava em olhar para aquelas linhas de vapores condensados de uma nova maneira: *“Sempre disséramos, com um fácil desembaraço, que a trajetória do elétron na câmara de nuvem podia ser observada. Mas o que realmente observávamos talvez fosse muito menos do que isso. Talvez víssemos apenas uma série de pontos distintos e mal definidos, pelos quais o elétron havia passado. Na verdade, tudo o que víamos na câmara de nuvem eram gotículas de água isoladas, elas mesmas muito maiores que o elétron. As perguntas corretas, portanto, seriam: pode a mecânica quântica representar o fato de que um elétron se encontra aproximadamente (ou seja, com uma certa imprecisão) num determinado lugar e se move aproximadamente (de novo, com uma certa imprecisão) com determinada velocidade? Podemos tornar estas aproximações tão estreitas que elas não provoquem dificuldades experimentais? ... um breve cálculo mostrou que de fato era possível representar matematicamente essas situações, e que as aproximações eram regidas pelo que depois viria a ser chamado ‘princípio da incerteza’ da mecânica quântica: o produto das incertezas dos valores medidos da posição e do momento não pode ser inferior à constante de Planck, ou um ‘quantum’ de ação. Achei que essa formulação estabelecia a tão necessária ponte entre as observações da câmara de nuvem e a matemática da mecânica quântica.”*⁽²⁶⁾

Essa passagem por segmentos do texto que procura explicitar as dificuldades e a importância da reflexão filosófica na fase de estruturação conceitual da mecânica quântica não deve obscurecer, ou descaracterizar, o formalismo matemático indispensável ao desenvolvimento dos conteúdos em uma disciplina como a Estrutura da Matéria I, de um curso de física. Como evidencia a constituição dos capítulos apresentada na seção anterior, ele se faz presente em todos os capítulos, com exceção do primeiro.

De fato, o capítulo 1 examina as raízes da física atômica, procurando contextualizar, historicamente, o objeto de estudo. Assim, discute como se desenvolveram as primeiras tentativas de compreender o visível a partir do invisível, entre os gregos antigos. Nesta trajetória, e também com o intuito de atrair a atenção do aluno, apresenta-se o esforço de Heisenberg em procurar um significado às formas geométricas de Platão, para quem reduzem-se a triângulos, equiláteros e isósceles, as estruturas fundamentais da natureza. Não se pode associar os triângulos elementares a qualquer tipo de matéria, é claro, pois são formas bidimensionais. Mas, e quanto aos poliedros regulares? Estaria o cubo apenas simbolicamente ligado à terra, como uma expressão de sua solidez, por exemplo, ou, de fato, teria uma forma cúbica o menor corpúsculo de terra? Entre as dúvidas e questionamentos de Heisenberg fica, contudo, uma certeza: é uma forma geométrica, uma construção intelectual, e não efetivamente a matéria que está na raiz última de todos os processos a partir dos quais a natureza pode ser entendida.

Na retomada do atomismo, a partir do século XVII, o “De rerum natura”, de Lucrécio, desempenha um papel fundamental. Por entre a diversidade de uma terminologia ambígua (que não se preocupa em estabelecer o significado preciso de termos como ‘partícula’, ‘corpúsculo’, ‘átomo’), Gassendi, Boyle, Newton e Bernoulli comungam a idéia de um matéria descontínua em sua estrutura. O capítulo encerra-se com uma discussão sobre a ascensão e declínio do flogístico, um conceito que origina uma série de estudos, na química, que vão contribuir para evidenciar a natureza atômica da matéria.

O capítulo 2 detalha a descoberta do elétron, em seus aspectos qualitativo e quantitativo, bem como as potencialidades e limitações dos primeiros modelos atômicos. Sem se ater à cronologia

histórica, mas ‘dentro do que é didático’ (como destacará um aluno em seus comentários críticos, na próxima seção), o texto ainda aborda a experiência de Millikan.

O quantum da radiação, que dá início ao período de turbulência conceitual em que se vê envolvida a física das duas primeiras décadas do século XX, é o conceito central do capítulo 3. Os primeiros estudos no campo da radiação térmica, desenvolvidos por Kirchhoff, contextualizam, historicamente, a radiação do corpo negro. A apresentação deste tema procura evidenciar a dinâmica das discussões entre teóricos e experimentais, ressaltando um processo de estruturação de conhecimentos em que o racionalismo e o empirismo se completam, atendendo às exigências do novo espírito científico, nos termos de Bachelard⁽²⁷⁾. A resolução de problemas, centrada na equação de Planck, ‘concilia’ (como ele pretendia) o seu resultado com relações válidas em certos segmentos do espectro eletromagnético, ensejando a integração dos assuntos abordados. Os efeitos fotoelétrico e Compton, separados pelo tempo, são tratados seqüencialmente e a seguir, nesta primeira versão do texto.

Os capítulos 4, 5 e 6, envolvendo a física de Bohr, as ondas de de Broglie e o princípio da incerteza, já receberam os comentários pertinentes.

O capítulo 7 discute e exemplifica a equação de Schrödinger, enfatizando o seu papel no começo de uma nova física.

Sobre a metodologia envolvida na utilização do texto

O texto “Tópicos de física moderna: introdução à mecânica quântica” tem sua origem a partir de uma série de notas de aula escritas pelo autor para a disciplina Estrutura da Matéria I, do curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal de Santa Catarina, no primeiro semestre de 2001. A longa greve das Instituições Federais de Ensino Superior do país, ocorrida no segundo semestre de 2001, ensejou a revisão desse material e a redação de novas seções, resultando em seu ‘compactamento’, com os conteúdos organizados em um único volume.

No semestre 02 de 2001 (cursado nos primeiros meses de 2002), utilizou-se este material junto a uma turma constituída por alunos da Licenciatura e do Bacharelado, do curso de Física, adotando a mesma estratégia de ensino do semestre anterior. Assim, procurando-se envolver ativamente o aluno com a disciplina, e com o texto, em particular, e também como forma de otimizar a apresentação e discussão dos conteúdos em sala de aula pelo professor, incentivou-se os estudantes à leitura prévia dos assuntos. Para isso, destinou-se aulas específicas voltadas para a leitura individual e discussão aluno-aluno, aluno-professor.

Todos os capítulos (exceto o primeiro) foram acompanhados de listas de problemas, fora do corpo do texto, concebidas, teoricamente, não com fins de uma mera ‘aplicação’ da teoria, mas de modo a estimular o intercâmbio teoria-problema, nos termos de Kuhn⁽⁸⁾.

A complementação do texto, com bibliografia adicional, típica da área^(28,29,30), foi igualmente sugerida aos alunos, tendo em vista que, nesta sua primeira versão, o texto ainda não se apresenta como auto-suficiente no desenvolvimento de todos os conteúdos abordados, ao menos da forma como se pretende, ao final da pesquisa. Os dois primeiros capítulos do livro de Heisenberg, “A imagem da natureza na física moderna”⁽³¹⁾, foram indicados como leitura suplementar e optativa.

Uma sondagem exploratória da receptividade do texto junto aos alunos

Uma avaliação preliminar do texto, em termos de sua receptividade junto aos alunos que cursaram Estrutura da Matéria I, no semestre 02 de 2001, apresentou resultados bastante satisfatórios e indicativos relevantes para o seu aperfeiçoamento e ampliação. Ela foi obtida a partir das respostas dos estudantes a um questionário escrito, no qual eles se posicionaram, primeiro quanto ao grau de dificuldade encontrado em relação a cada uma das seções do texto⁺ e, logo em seguida, quanto à clareza na abordagem dos conteúdos e estruturação de idéias, analisando-o criticamente.

A radiação de corpo negro, as ondas de matéria de de Broglie e a mecânica ondulatória de Schrödinger (que os alunos estavam começando a estudar, quando responderam o questionário) foram os assuntos apontados como de mais difícil entendimento. Os demais conteúdos foram, em geral, considerados de fácil ou de média compreensão.

As observações críticas dos estudantes encerram um espectro bastante diversificado, que ressaltam:

a) a importância do papel do professor, como facilitador da compreensão do texto:

Aluno 1: *“Acho que a apostila ajuda e muito na compreensão de todos os assuntos apresentados. Tenho certeza de que se a turma estivesse estudando os tópicos apresentados apenas através de livros o resultado teria sido muito pior.”*

Nada disso tem valia sem a ajuda de um profissional capaz de interagir e fazer o elo de ligação entre o aluno (o que o aluno compreende quando lê o texto) e o que realmente o texto quer frizar. Obs.: Muitas vezes são compreensões diferentes.”

Aluno 2: *“Para que se tenha uma plena clareza dos conteúdos é necessário a interpelação [interlocução] do professor. Pois acho que o texto, por si só, deixa bastante margem para dúvidas. No entanto, acredito ser difícil um texto didático 100% auto-suficiente.”*

b) as dificuldades inerentes aos conteúdos estudados:

Aluno 4: *“É um ótimo subsídio para o aprendizado da disciplina Estrutura da Matéria I posto que poucos são os livros disponíveis na Biblioteca. Os textos são claros, a dificuldade provém da matéria em si. A visão histórica e a cronologia (dentro do que é didático) tornam mais fácil a compreensão dos temas.”*

Aluno 5: *“Na verdade a maior dificuldade para mim, na compreensão do conteúdo, é o fato de ser um assunto bem diferente ao que até então lidamos (mecânica clássica).”*

Aluno 8: *“As maiores dificuldades que encontrei, acredito que tenham sido na compreensão do conteúdo, e não na compreensão do texto, pois acho que são conceitos difíceis de serem passados para o aluno. Como por exemplo a teoria de Bohr.”*

c) a falta de clareza de conteúdos específicos:

⁺ De acordo com a seguinte escala: (FC), de fácil compreensão; (MC), de média compreensão; (DC), de difícil compreensão e (SO), sem opinião.

Aluno 6: “O texto “Tópicos de Física Moderna: introdução à Mecânica Quântica” esteve em geral claro nas suas abordagens. Qualitativamente o texto apresenta uma seqüência lógica de idéias muito úteis para o domínio posterior da Mecânica Quântica. Quantitativamente o texto apresenta uma lacuna na introdução a quantização da energia de Planck. Talvez fosse importante mostrar aos alunos como Planck supôs tal fenômeno (através da distribuição de Boltzmann seria um exemplo interessante).”

Aluno 8: “O que eu, lendo o texto com atenção, ainda não consegui entender muito bem foi a ‘A radiação de corpo negro’. Não sei nem o que sugerir para tornar essa parte mais clara, mas essa foi a seção que realmente não entendi.”

Aluno 11: “É difícil entender o conceito de v_g [velocidade de grupo].”

d) outras sugestões:

Aluno 1: “...que o texto apresente algumas figuras instrutivas (um pouco mais do que já possui) pois alguns capítulos são muito abstratos e com isso facilitaria a vida do aluno.”

Aluno 2: “... um pouco mais de rigor na ordem cronológica, bem como o paralelo com a cultura, o momento histórico no qual as idéias foram germinadas.”

Aluno 3: “... as deduções de fórmula, são muito complicadas de entender e muito cansativas, para uma melhor compreensão, elas deveriam ser melhor explicadas, passo a passo, o que se nota é que muitas vezes elas são abreviadas na passagem de uma equação para outra.”

Aluno 4: “Escreva sobre a última parte da matéria e transforme tudo num livro. Ah, faça o mesmo para a disciplina Estrutura II.”

Aluno 7: “... existem em alguns momentos da leitura a sobrecarga de informações dificultando a compreensão. Sugiro inserir mais exemplos, simples, após os capítulos e não somente no final de cada “livro”.”

Aluno 10: [Referindo-se ao capítulo 6] “Acho que poderia acrescentar mais problemas no relacionamento teoria-problema. Parece que não foi dada tanta ênfase aos problemas deste capítulo. Não sei se basta sabermos bem o que significa $\Delta x \Delta p \geq h$, a incerteza da determinação da posição e momento linear de uma partícula atômica. E a impossibilidade de determinarmos simultaneamente a posição e o momento.”

Esse aluno faz, ainda, uma interessante observação sobre o conteúdo do capítulo 1, especialmente sobre o conceito de peso, que precisa ser ‘desaprendido’ para se entender o seu significado no contexto de idéias de uma outra época:

“Acho que é de extrema importância o estudo do atomismo desde os gregos que afinal foram os precursores. Os textos são muito bem escritos. Talvez algo que poderia ser melhor especificado é quanto ao tópico 1.3 – O atomismo de Demócrito, na página 6 quando fala sobre Epicuro, que “concebe os átomos destituídos de peso”. Seria interessante explicitar o que realmente seria o peso do corpo, que era tido como uma qualidade.

Claro que também concordo que a deficiência foi da turma quanto a dificuldade de nos desvincularmos de conceitos que hoje fazem parte de nossas vidas, para realmente entendermos o que se queria dizer na época, e o que significava para a época.

Acredito que este tenha sido o ponto chave para mergulharmos nas “raízes históricas da Física Atômica”. Outro exemplo disso foi na página 5, no último parágrafo. Percebi que além da minha, a dificuldade também foi da turma no que Aristóteles queria dizer, que para que haja movimento não é necessário vázio. Agora me sinto ridícula com estas dúvidas (já esclarecidas com as devidas discussões em sala de aula), mas depois dos primeiros contatos com o texto, senti a necessidade de desvincular-me de minhas concepções, que são a da comunidade científica de hoje, e mergulhar em outro tempo, outra história que para mim não havia existido.

Talvez fosse importante acrescentar à introdução uma preparação do que discuti acima, pois existem estes conceitos como peso, que estão impregnados em nossas mentes, e então não conseguimos pensar na possibilidade de um dia eles não terem existido.”

Considerações finais

Para efeitos de uma sondagem exploratória da repercussão do texto “Tópicos de física moderna: introdução à mecânica quântica”, junto a alunos da disciplina Estrutura da Matéria I, do curso de Física da Universidade Federal de Santa Catarina, no semestre 02 de 2001, considerou-se suficiente a metodologia utilizada tanto em sua aplicação quanto em sua avaliação.

As respostas dos estudantes ao questionário escrito corroboram as observações do autor em sala de aula, que mostram ser necessário implementar reformulações em alguns segmentos do texto a fim de lhes conferir melhor clareza, seja reestruturando parágrafos em linguagem mais acessível, intercalando novos e significativos conteúdos aos já existentes, ou mesmo redimensionando o posicionamento de certos assuntos visando, principalmente, um melhor encadeamento histórico.

É interessante observar que, entre os comentários críticos dos alunos, não há nenhuma menção explícita a dificuldades relacionadas à filosofia da ciência, aos autores citados, em particular. Isso provavelmente se deve à discussão teórica realizada pelo professor em sala de aula, suprimindo a não autonomia do texto em relação a essa temática. O ‘preenchimento’ dessa lacuna, demandará novas pesquisas.

Por outro lado, a boa aceitação do texto entre os alunos estimula a elaboração de novos capítulos, mantendo a filosofia adotada na abordagem dos assuntos, de modo a dar continuidade ao projeto de estruturação de um material instrucional diferenciado, que atenda a todo o programa de Estrutura da Matéria I⁺.

A ampliação do texto, centrada em um dos componentes da matriz disciplinar de Thomas Kuhn, o de exemplar, parece compatível com o engajamento do aluno na solução de problemas clássicos, como o potencial degrau, a barreira de potencial, o poço de potencial, o oscilador harmônico e o átomo de hidrogênio, à luz da formulação de Schrödinger da mecânica quântica.

Os exemplares constituem “as soluções concretas de problemas que os estudantes encontram desde o início de sua educação científica, seja nos laboratórios, exames ou no fim dos capítulos dos manuais científicos”⁽⁸⁾. São eles, enfim, que ensinam ao futuro cientista a articulação das generalizações simbólicas, a análise das soluções possíveis, a prática indispensável ao seu

⁺ A ementa dessa disciplina, com carga horária de 108 horas-aula, é a seguinte: Estudo das evidências que levaram ao surgimento da Física Moderna. Estrutura atômica da radiação e da matéria. Modelos atômicos de Rutherford e Bohr. Dualidade onda-partícula. Teoria de Schrödinger para problemas unidimensionais. Átomo de hidrogênio.

engajamento na ciência normal. Em função desses novos conteúdos, e de um redimensionamento do capítulo 7, espera-se minimizar as dificuldades do aluno em relação a esse segmento do texto.

A articulação do texto com bibliografia relativa à divulgação científica pode proporcionar ao aluno um complemento significativo à seus estudos, seja no acesso à leitura de obras escritas por autores que foram personagens centrais na história da estruturação dos fundamentos da física quântica^(3,31,32,33,34), ou de outras, de reconhecida relevância^(35,36,37,38). O delineamento de estratégias, nesse sentido, é um campo promissor à pesquisa.

Objetos atômicos como elétrons, prótons, fótons, etc, possuem realidade física independentemente dos seres humanos e de suas observações? Isto é, pode-se estender ao nível atômico a objetividade e o determinismo da física clássica? A resposta a esta questão, que constitui o núcleo central de um intenso debate que vai colocar em posições opostas físicos como Bohr, Heisenberg e Born, de um lado, e Planck, Einstein, de Broglie e Schrödinger, de outro, será objeto de estudo em um capítulo específico, em uma nova versão do texto. Do ponto de vista didático, notadamente, esse tema é de grande interesse pois, conforme Selleri⁽³⁹⁾, “*as dificuldades apresentadas pela maior parte dos estudantes de física para compreender a mecânica quântica estão profundamente vinculadas a uma atitude filosófica realista, ainda que não seja de forma consciente. Atitude que, por sua vez e de maneira explícita, foi a raiz de uma extensa disputa, ainda aberta, entre os seguidores do paradigma de Compenhague-Gotinga e defensores de idéias filosóficas bem distintas, como Einstein, de Broglie, Schrödinger, Planck, Ehrenfest, etc.*”.

Referências

1. ANGOTTI, J.A. Fragmentos e totalidades no conhecimento científico e no ensino de ciências. Tese de Doutorado, FEUSP, São Paulo, 1991. pp.36-37.
2. GALILEI, G. *O ensaiador*. São Paulo, Nova Cultural, 1996. p.46.
3. HEISENBERG, W. *A parte e o todo: encontros e conversas sobre física, filosofia, religião e política*. Rio de Janeiro, Contra-ponto, 1996. p.42.
4. EINSTEIN, A. *Notas autobiográficas*. Rio de Janeiro, Nova Fronteira, 1982. p.55.
5. BOHM, D. & PEAT, F.D. *Ciência, ordem e criatividade*. Lisboa, Gradiva, 1989. pp.10-13.
6. BACHELARD, G. *O novo espírito científico*. Lisboa, Edições 70, 1986.
7. POPPER, K.R. *Conjecturas e refutações*. Brasília, Editora Universidade de Brasília, 1982.
8. KUHN, T.S. *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo, Editora Perspectiva, 1987.
9. LAKATOS, I. *La metodología de los programas de investigación científica*. Madrid, Alianza, 1989.
10. FEYERABEND, P. *Contra o método*. Rio de Janeiro, Francisco Alves, 1985.
11. HANSON, N.R. *Patrones de descubrimiento. Observación y explicación*. Madrid, Alianza Editorial, 1985.
12. CHALMERS, A.F. *O que é ciência afinal?* São Paulo, Brasiliense, 1993. p.28.

13. HEISENBERG, W. Referência 3. p.52.
14. LAKATOS, I. *Falsificação e metodologia dos programas de investigação científica*. Lisboa, Edições 70, 1999. p.71.
15. LAKATOS, I. Referência 14, p.67.
16. PEDUZZI, L.O.Q. As concepções espontâneas, a resolução de problemas e a história e filosofia da ciência em um curso de mecânica. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1998. pp. 606-713.
17. HEISENBERG, W. Referência 3, pp.48-49.
18. HEISENBERG, W. Referência 3, pp.49-50.
19. HEISENBERG, W. Referência 3, pp.54.
20. SELLERI, F. *El debate de la teoría cuántica*. Madrid, Alianza Universidad, 1986. Citação, p.16.
21. FEYNMAN, R. *O que é uma lei física?* Lisboa, Gradiva, 1989. pp.164-165.
22. BACHELARD, G. Referência 6, p.65.
23. BACHELARD, G. *Epistemologia*. Rio de Janeiro, Zahar, 1983. Citação, p.59.
24. BACHELARD, G. Referência 23, p.59.
25. HEISENBERG, W. Referência 3, p.78.
26. HEISENBERG, W. Referência 3, pp.95-96.
27. BACHELARD, G. *A filosofia do não*. In: Coleção os Pensadores, São Paulo, Abril Cultural, 1978.
28. EISBERG, R.M. *Fundamentos da física moderna*. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1979.
29. EISBERG, R. & RESNICK, R. *Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas*. Rio de Janeiro, Campus, 1979.
30. ALONSO, M. & FINN, E.J. *Quantum and statistical physics*. Massachusetts, Addison-Wesley, 1969.
31. HEISENBERG, W. *A imagem da natureza na física moderna*. Lisboa, Edição Livros do Brasil.
32. BOHR, N. *Física atômica e conhecimento humano: ensaios 1932-1957*. Rio de Janeiro, Contra-ponto, 1995.
33. BOHR, N. *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza*. Madrid, Alianza Universidad, 1998.

34. HEISENBERG, W., BORN, M., SCHRÖDINGER, E. & AUGER, P. *Problemas da física moderna*. São Paulo, Editora Perspectiva, 1969.
35. PAIS, A. “*Sutil é o Senhor ...*”: *a ciência e a vida de Albert Einstein*. Rio de Janeiro, Nova Fronteira, 1995.
36. SEGRÈ, E. *Dos raios X aos quarks: físicos modernos e suas descobertas*. Brasília, Universidade de Brasília, 1987.
37. WEISSKOPF, V. *A revolução dos quanta*. Portugal, Terramar, 1989.
38. D’ESPAGNAT, B. & KLEIN, E. *Olhares sobre a matéria: dos quanta e das coisas*. Lisboa, Instituto Piaget, 1993.
39. SELLERI, F. Referência 20, pp16-17.