

**UMA ANÁLISE SOBRE A REALIDADE DAS ENTIDADES CIENTÍFICAS EM UM LIVRO DE FÍSICA DO ENSINO SUPERIOR***An Analysis on the Reality of Scientific Entities in a Higher Education Physics Textbook***Fábio Marineli** [fabio.marineli@dex.ufla.br]

Departamento de Ciências Exatas

Universidade Federal de Lavras

Av. Central UFLA, s/n, Campus Universitário, Lavras, MG, Brasil

**Maurício Pietrocola** [mpietro@usp.br]

Faculdade de Educação

Universidade de São Paulo

Av. da Universidade, 308, Cidade Universitária, São Paulo, SP, Brasil

**Resumo**

No presente trabalho apresentamos uma investigação acerca da abordagem sobre entidades científicas em um livro didático de física do ensino superior. Procuramos analisar a justificativa usada pelo livro *Fundamentos de Física* (Halliday, Resnick & Walker, 2009a; 2009b; 2009c; 2009d) para que o fóton, o quark e o elétron sejam tomados como reais e, além disso, se as caracterizações e discussões relativas à realidade dessas entidades são significativas frente às demais vezes em que conteúdos referentes a elas aparecem no livro. A pesquisa levou em consideração que ensinar/aprender física envolve não somente tratar de aspectos conceituais e operacionalizações das suas teorias, mas também reflexões sobre questões relacionadas à natureza dos conhecimentos científicos, inclusive sobre a realidade das entidades da ciência. Como resultado, foi possível perceber que justificativas utilizadas pelo livro para as entidades serem consideradas reais se deram por meio de inferências abduativas, mas de maneira pouco explícita e pouco frequente. Além disso, as entidades são tratadas na maior parte do tempo de forma operacional. Entendemos que a abordagem do Halliday possui uma feição “rotineira” (Giddens, 2009), considerando o caráter habitual do uso das entidades em atividades que envolvem aplicação e resolução de problemas algébricos, que não exigem reflexões sobre a realidade delas, mas tão somente reflexões concernentes ao “como fazer”. Atividades com feição rotineira limitam os modos de pensar àquilo que Giddens chamou de *consciência prática* e, dessa forma, a compreensão acerca da realidade das entidades daqueles que estudam física por meio desse livro pode permanecer em um nível tácito e utilitário, não havendo elementos suficientes para o esclarecimento da problemática relativa a como a ciência caracteriza a realidade e, mais ainda, em que sentido as entidades científicas podem realmente ser tomadas como reais.

**Palavras-Chave:** Entidades Científicas; Realidade; Livro Didático; Halliday; Rotinização.**Abstract**

In this paper, we present an investigation on the approach to scientific entities in a higher education physics textbook. We seek to analyze the justification displayed in the textbook *Fundamentals of Physics* (Halliday, Resnick & Walker, 2009a; 2009b; 2009c; 2009d) for the perception of the photon, the quark, and the electron as real entities, and furthermore if the descriptions and discussions relating the reality of these entities are significant in comparison to the content related to them displayed elsewhere in the textbook. The research took into consideration that teaching/learning physics involves not only treating conceptual aspects and the operationalization of its theories, but also reflections on questions related to the nature of scientific knowledge, including the reality of scientific entities. As a result, it was possible to identify that abductive inferences were used by the textbook as reasoning for the entities to be considered real, but neither in an explicit nor frequent way. Moreover, the entities are treated mainly in an operational way. We understand that Halliday's approach has “routine” features (Giddens, 2009), considering the regular use of the entities in activities that involve application and resolution of algebraic problems, which do not demand reflections on their reality, but only present questions regarding “how to do it”. Activities with routine features restrict the ways of thinking to what



Giddens calls *practical conscience*, so the reality comprehension concerning these entities of those who study physics through this textbook remains therefore tacit and utilitarian, not offering sufficient elements for the elucidation of the problem relating the way science describes reality and, what is more, in which sense the scientific entities can really be taken for real.

**Keywords:** Scientific Entities; Reality; Textbook; Halliday; Routinization.

## INTRODUÇÃO

Thomas Kuhn (2005), na sua formulação teórica sobre o desenvolvimento histórico da ciência, atribuiu grande importância aos livros didáticos (ou manuais), tendo em vista que são veículos por meio dos quais os futuros cientistas (estudantes universitários) tomam contato com aquilo que é considerado consensual em um determinado campo científico e, nas conceituações do autor, com determinado paradigma. O livro seria parte essencial daquilo que Kuhn chamou de “ciência normal”, reproduzindo as formas de compreensão do mundo, as técnicas de resolução de problemas e os valores e regras explícitas e implícitas que caracterizam o paradigma vigente. Desse modo, o livro didático é um elemento formativo importante, ainda mais por ser o material de ensino-aprendizagem predominantemente utilizado nas disciplinas científicas de nível superior (Moreira, 2000; Zwiebel, 2012).

O livro didático de ciências registra uma reconstrução ordenada e linearizada de certos conhecimentos aceitos por uma dada comunidade científica (Vieira & Fernández, 2006). A apresentação de ideias e conceitos é fruto de uma organização que atende a objetivos didáticos, envolvendo transformações no conhecimento original, tais como descritas por Chevallard (1991) na teoria da *Transposição Didática*. Além disso, na composição dos livros, há ainda outros elementos, definidos pelos autores e por decisões editoriais, como a escolha de conteúdos, formas de apresentação, tipos de atividade indicadas etc. Enfim, a elaboração de um livro abrange inúmeros elementos, que determinam uma forma de ensinar e aprender a ser oferecida como possibilidade àqueles que o utilizarão.

Apesar das diferentes possibilidades de uso do livro em salas de aula, podendo haver mais ou menos utilização direta das ideias apresentadas nele, consideramos que ao se escolher um livro didático de física, em certa medida leva-se aos alunos que o utilizarão uma dada visão dessa ciência e do conhecimento físico que aparece no livro. É com essa ideia em mente que buscamos realizar uma análise das maneiras pelas quais certas entidades científicas são caracterizadas e tomadas como reais em uma coleção de livros didáticos de física do ensino superior, tendo em conta que a abordagem do livro sobre essas entidades será levada aos estudantes.

A presente análise é parte de uma pesquisa mais ampla (Marineli, 2016), que realizou uma abordagem acerca da realidade das entidades científicas no contexto da formação de professores de física, levando em consideração que um professor, durante sua atuação profissional, precisará lidar com a questão da realidade de entidades não acessíveis aos sentidos, tendo talvez de explicar em que se baseia uma proposição sobre sua existência. Em trabalho anterior (Marineli & Pietrocola, 2016), apresentamos um estudo acerca de como licenciandos em Física caracterizam a realidade de certas entidades. Agora buscamos analisar como um livro faz isso.

Considerações acerca da realidade de entidades inobserváveis da ciência não são triviais. Isso pode ser percebido nas discussões referentes ao realismo/antirrealismo científicos (Matthews, 1994; Dutra, 1998; Silva, 1998; Tiercelin, 1999), que entre outras coisas aborda o *status* ontológico das entidades científicas. Julgamos que o entendimento da problemática em torno dessa discussão seria importante para um professor de física, mesmo ela sendo classificada em alguns trabalhos como um aspecto não consensual da natureza da ciência (Eflin, Glennan & Reisch, 1999)<sup>1</sup>. Em situações de ensino seria indesejável um tratamento dessas entidades como se sua existência fosse algo trivial, tal como a existência dos objetos ordinários que podem ser diretamente apreendidos pelos sentidos, ou como se elas fossem meras ficções, ignorando os avanços científicos e tecnológicos realizados levando em consideração sua existência. É nesse sentido que entendemos a necessidade de certa compreensão desses elementos por um professor.

Na literatura é apontada a necessidade de um entendimento de aspectos da natureza da ciência por professores (Lederman, 1992; Mccomas, Clough & Almazroa, 1998; Fernández *et al.*, 2002; Moura, 2014).

<sup>1</sup> Para mais informações acerca do debate sobre aspectos consensuais e não consensuais da Natureza da Ciência, e até críticas a essa classificação, além da referência citada, ver Bagdonas, Zanetic e Gurgel (2014), Moura (2014) e Martins (2015).



Dessa forma, consideramos importante uma compreensão sobre a ciência que vá além da operacionalização matemática de conceitos, incluindo uma reflexão crítica a respeito da própria ciência e de suas formas de atuar e construir conhecimentos sobre o mundo. A temática da realidade das entidades científicas está incluída nessa abordagem, como parte das dimensões ontológica (**o que** a ciência estuda) e epistemológica (**como** estuda esses “o ques”) do conhecimento científico.

Para a análise aqui realizada – sobre como entidades científicas são caracterizadas e tomadas como reais em uma coleção de livros didáticos de física –, focamo-nos especificamente em três partículas: o fóton, o quark e o elétron. Nossa intenção não é buscar saber o que a física diz sobre elas, nem os processos históricos envolvidos na caracterização dessas entidades, mas sim como o livro as apresenta/aborda<sup>2</sup>. Dessa forma, realizamos um estudo com o objetivo de conhecer: (1) a maneira de introduzir as entidades no livro e as justificativas para serem tomadas como reais, ou seja, o critério usado para caracterizar sua realidade e (2) se as discussões sobre a realidade das entidades, bem como outras caracterizações sobre elas, são significativas frente às demais vezes em que conteúdos referentes a elas aparecem no livro.

Em relação ao segundo objetivo, nossa investigação buscou compreender se as entidades científicas são tratadas no livro de uma forma que possamos caracterizar como “rotineira” (Giddens, 2009), considerando que nessas situações a reflexividade estaria de certo modo limitada, assim como estariam limitadas certas formas de compreensão acerca dessas entidades. Mais adiante abordaremos melhor essa questão.

## O LIVRO ANALISADO

Para a nossa pesquisa, o livro escolhido para análise foi o *Fundamentos de Física* (Halliday, Resnick & Walker, 2009a; 2009b; 2009c; 2009d) que na edição brasileira é uma coleção. Esse é um dos mais famosos livros de física, amplamente utilizado nas disciplinas iniciais de cursos superiores, comumente conhecido como livro do Halliday. Foi considerado pela *American Physics Society* como “o texto de física mais marcante do século XX” (Zwiebel, 2012, p.8, tradução nossa).

A coleção em questão possui 4 volumes, divididos nos temas: Mecânica (vol.1), Gravitação, Ondas e Termodinâmica (vol.2), Eletromagnetismo (vol.3) e Óptica e Física Moderna (vol.4). No prefácio dos livros (que é o mesmo nos quatro volumes), aparecem algumas noções a respeito da relação entre a física e o mundo. Nele encontramos a frase “a física é o assunto mais interessante do mundo porque descreve o modo como o mundo funciona [...]”. E, ainda, “[...] o curso associado a este livro [...] revela os mecanismos fundamentais do mundo, responsáveis por todas as aplicações científicas e de engenharia” (Halliday, Resnick & Walker, 2009a, p.xi). Nesses trechos transparece uma noção realista em relação à física, pois considera que o objetivo dela não seria apenas dominar o conhecimento sobre o mundo físico, mas ir além e revelar seus mecanismos fundamentais.

Menções aos objetivos do livro aparecem em dois locais, ambos no prefácio. Na primeira menção é dito que o objetivo do livro seria “[...] proporcionar aos professores um instrumento através do qual possam ensinar os alunos a estudar assuntos científicos, identificar conceitos fundamentais, pensar a respeito de questões científicas e resolver problemas quantitativos” (Halliday, Resnick & Walker, 2009a, p.xi). Aqui está sendo feita referência ao livro como um guia para a atuação docente. Mas também é dito que “um dos principais objetivos [do] livro é ensinar os estudantes a usar o raciocínio para resolver problemas, desde os princípios básicos até a solução final” (Halliday, Resnick & Walker, 2009a, p.xii). Nesse trecho aparece a noção que o livro também objetiva o uso direto por estudantes, enfatizando a resolução de problemas.

Os capítulos do Halliday possuem todos a mesma estrutura. Em linhas gerais, o projeto editorial dos capítulos é constituído por (i) uma parte inicial, composta por um texto com o conteúdo tratado, que chamamos de *parte principal*, (ii) por uma parte de *revisão e resumo*, (iii) por uma de *perguntas* e, por fim, (iv) uma parte de *problemas*. A *parte principal* (i) é dividida em seções e subseções. Os elementos que a compõe são títulos e subtítulos, o corpo mesmo do texto (incluindo equações, imagens e tabelas), legendas (de imagens e equações), exemplos e, em alguns capítulos, testes e táticas para a resolução de problemas. Após a *parte principal*, na sequência do capítulo, existe a parte de *revisão e resumo* (ii) do que foi visto anteriormente, fixando-se principalmente nos resultados das teorias apresentadas. Essa segunda parte também possui títulos e pode ter equações e figuras com suas legendas. A terceira parte (iii) é composta por *perguntas* (que

<sup>2</sup> Outra análise relativa à abordagem do Fóton e do Efeito Fotoelétrico no livro *Fundamentos da Física* e em outras obras, que inclui uma perspectiva histórica, pode ser encontrada em Lima *et al* (2017a; 2017b).

não envolvem cálculos) e, por fim, a quarta parte (iv) é onde são apresentados *problemas* (esses sim com cálculos algébricos, salvo raras exceções, e em quantidade muito maior que as perguntas). Essa última parte também apresenta títulos, idênticos aos títulos das seções da parte principal, indicando a quais seções os problemas se referem.

No Quadro 1 a seguir apresentamos, para melhor visualização, o projeto editorial dos capítulos do livro, com cada parte que os compõe e suas subdivisões.

**Quadro 1 – Projeto editorial dos capítulos do Halliday**

Divisões dos capítulos	Componentes das divisões
Parte principal	Títulos e subtítulos
	Corpo do texto
	Legendas
	Exemplos
	Testes
	Táticas para a resolução de problemas
Revisão e resumo	Títulos
	Corpo do texto
	Legendas
Perguntas	Corpo do texto
Problemas	Título da seção correspondente
	Corpo do texto

## FORMA DE ANÁLISE DO LIVRO

Na análise da coleção de livros, realizamos uma Análise de Conteúdo (Moraes, 1999), bem como descrições qualitativas de partes do livro. Cabe mencionar que além dos quatro livros que compõem a coleção (Halliday, Resnick & Walker, 2009a; 2009b; 2009c; 2009d), também usamos a versão em inglês dela (Halliday, Resnick & Walker, 2008), que é seu idioma original, para tirar algumas eventuais dúvidas que apareceram na leitura da versão em português. Dos livros, olhamos somente aquilo que estava no interior dos capítulos, ou seja, ficaram de fora sumários, prefácio, conteúdos dos apêndices, respostas dos problemas, índices, tabelas com propriedades e tabelas com constantes físicas. Para a Análise de Conteúdo definimos como *unidade de análise* trechos em que havia menções, no singular ou no plural, às entidades investigadas (que são o fóton, o quark e o elétron, como já dissemos). Queríamos observar a forma pela qual eram feitas essas menções às entidades, se havia uma justificativa para que elas fossem tomadas como reais, ou se havia alguma caracterização delas, e os locais do texto em que isso ocorria. Esses locais foram, justamente, nossa *unidade de contexto*, ou seja, registramos se as menções às entidades foram feitas na parte principal do texto (em algum de seus componentes), na parte da revisão, na parte das perguntas ou na parte dos problemas.

Ainda sobre a *unidade de análise*, a definição dos trechos selecionados dependia da parte do capítulo onde estavam, mas sempre buscando selecionar uma ideia completa. Quando no *corpo do texto* da *parte principal*, os trechos foram definidos por subseção. A *parte principal* dos capítulos da coleção de livros está dividida em seções e essas, na maioria dos casos, em subseções. Não separamos as subseções em partes menores entendendo que não faria sentido subdividi-las, tendo em vista que formam o todo de uma explicação ou caracterização.

Cabe esclarecer que, diferentemente dos capítulos e seções, as subseções originalmente não possuem numeração, dessa forma, criamos nosso próprio critério para numerá-las: as subseções de cada seção foram numeradas a partir de zero, com esse número correspondendo ao texto logo abaixo do título da seção e os demais números, em ordem crescente, foram atribuídos para os textos seguintes aos títulos das subseções. Assim, por exemplo, nos referimos ao capítulo 38, seção 3, subseção 1 como 38.3.1. Já quando a seção não possui subseções, ficaram apenas os dois primeiros números, como 39.5.



Em relação às demais partes que compõem a *parte principal* dos capítulos, adotamos os critérios descritos a seguir. Os *títulos*, *subtítulos* e *legendas* (incluindo títulos de tabelas) não foram incluídos na categorização. Consideramos que as menções nessas partes podiam não compor uma ideia completa, o que tornava sem sentido tentar categorizá-las. Os *exemplos*, *testes* e *táticas para a resolução de problemas*, que estavam na *parte principal* do capítulo, esses sim foram considerados para a categorização. No entanto, apesar de eles estarem dentro de alguma subseção, foram tratados de forma separada dela. O próprio livro faz essa separação e, para os fins de classificação, consideramos esses trechos de forma independente do texto da subseção onde eles estavam inseridos. Para nos referirmos aos exemplos, seguimos a mesma numeração atribuída pelo livro. Para os *testes* e para as *táticas para a resolução de problemas*, indicamos inicialmente o número do capítulo e, em seguida, o número do teste ou da tática. Por exemplo, nos referimos ao teste 3 do capítulo 21 como 21.3.

Além da *parte principal* (que acabamos de descrever), os capítulos possuíam ainda mais três partes: uma de *revisão e resumo*, uma de *perguntas* e uma de *problemas*.

As partes de *revisão e resumo* estavam estruturadas em tópicos. Dessa forma, para a escolha dos trechos, optamos por usar o tópico todo, sem separá-lo em trechos menores. Referimo-nos a eles mencionando o capítulo em que aparecem e usando o nome do tópico. Assim como na parte principal, também aqui os títulos e legendas não foram incluídos na categorização.

Já em relação às partes das *perguntas* e dos *problemas*, os trechos mínimos foram cada pergunta e cada problema, tomados de forma inteira. Para nos referirmos a eles, indicamos o número do capítulo e, em seguida, o número da pergunta ou do problema. Aqui, os títulos também não foram incluídos.

Para a *categorização*, os trechos com as menções às entidades foram classificados em duas categorias, definidas a priori, de acordo com o que era tratado neles:

**Categoria 1 – Existência/caracterização.** Entraram aqui dois tipos de trechos que mencionavam as entidades: o primeiro tipo corresponde aos locais em que era explicado porque determinada entidade era tomada como real, ou seja, quando era dado algum tipo de justificativa para a atribuição de realidade a ela; o segundo tipo corresponde aos trechos onde era realizada alguma caracterização das entidades. De modo geral, foi considerada justificativa qualquer tipo de recurso textual que buscava demonstrar as razões para que certa entidade fosse considerada real. Por oposição, uma apresentação sem justificativa era feita de modo *ad hoc* ou de forma axiomática. Já como caracterização foram consideradas partes do texto que associavam a entidade a certas características ou propriedades, geralmente no momento em que era introduzida pela primeira vez.

**Categoria 2 – Aplicação e outros.** Diz respeito aos locais no texto em que era feito “uso” das entidades (muitas vezes junto das teorias que lhes dão suporte), mas sem que fosse apresentada justificativa para lhes atribuir realidade e sem ser feita alguma caracterização. Na maioria das vezes, esse tipo de “uso” estava relacionado com a apresentação de formulações teóricas ou com a proposição ou a resolução de problemas. Nesses casos, as entidades já eram dotadas de certas características estabelecidas e assumidas como reais. Também entraram nesta categoria os casos em que eram feitas simples menções a elas em meio a abordagem de outro assunto, como, por exemplo, menção ao elétron em meio a uma discussão sobre movimento.

Em relação à Categoria 1, sabemos que deixar em uma mesma categoria elementos que trazem justificativa de existência das entidades com outros que apresentam suas características pode não esclarecer bem a distinção entre, por um lado, caracterizações e atribuições de existência justificadas e, por outro, caracterizações que somente são discriminadas sem preocupações com as justificativas. A questão é que as partes do livro que tratam da existência das partículas muitas vezes são as mesmas que as caracterizam, dificultando essa separação (como, por exemplo, na subseção 44.8.0 que trata do modelo dos quarks). Além disso, também apareceram casos, como o do fóton, em que são apresentadas algumas características da entidade em uma seção (38.2) e, na seção seguinte (38.3), diz-se que a entidade é tomada como real para se explicar um fenômeno (o efeito fotoelétrico, no caso), usando para isso as características apresentadas anteriormente. Isso mostra que separar as menções sobre o porquê de uma partícula ser tomada como real das menções sobre as características dela nem sempre era viável, já que em alguns locais esses elementos aparecem juntos no livro, um dando suporte ao outro. Outra justificativa para a junção é que a atribuição de realidade a uma partícula e a atribuição de características a ela são feitas, algumas vezes, por meio do mesmo tipo de inferência (como foi o caso da inferência usada para afirmar a existência do fóton e para a consideração de que ele possui momento). Mais à frente, na descrição qualitativa, buscaremos deixar mais claro esse ponto.

Para a categorização dos trechos que citam as entidades, adotamos o seguinte procedimento: para pertencer à Categoria 1 deveria haver no trecho (i) uma explicação sobre o porquê de a partícula ser considerada real ou (ii) ser feita alguma caracterização dela; para pertencer a Categoria 2, no trecho não deveriam haver os dois casos anteriores, mas somente “usos” da entidade em situações específicas.

A análise foi feita por uma combinação de métodos quantitativo e qualitativo. Num primeiro momento, apresentaremos os resultados obtidos com a categorização, descritos por meio de quadros com o número de trechos classificados em cada categoria. Num segundo momento serão apresentadas descrições qualitativas das formas pelas quais as três entidades são tratadas no livro e como é justificada sua realidade. A combinação dos dois métodos permite, por um lado, evitar que o número de categorizações de trechos onde as entidades aparecem no texto seja tomado como uma medida absoluta de sua importância. Por outro lado, apenas apresentar uma análise da qualidade das justificativas de realidade pode dar uma falsa ideia de importância das mesmas no texto, caso a apresentação acabe sendo feita de modo descolado do panorama geral.

### Descrições dos resultados da categorização

Um dos objetivos do presente estudo é investigar se as discussões sobre a realidade das entidades, bem como suas caracterizações, são significativas frente às demais vezes em que conteúdos referentes a elas aparecem no livro (quando já caracterizadas e consideradas reais). Tendo isso em vista, apresentamos a seguir, nos Quadros 2 a 4, o número de trechos em que cada uma das entidades analisadas é mencionada no livro, apontando as partes do texto em que apareceram e a categoria em que o trecho foi classificado. No Apêndice se encontram quadros completos, apontando os locais do livro em que ocorrem as menções e a categoria na qual os trechos foram classificados. Para a localização das menções e a seleção dos trechos, foi utilizada uma versão digital em inglês do livro (Halliday, Resnick & Walker, 2008). No entanto, levamos em consideração que as menções na versão em português são as mesmas da versão em inglês.

**Quadro 2** – Número de trechos que mencionam a palavra fóton ou fótons, categorizados

Entidade	Parte do texto	Categoria 1	Categoria 2
Fóton	Seções/subseções (corpo do texto)	7	29
	Exemplos	1	8
	Testes	0	0
	Táticas	0	0
	Revisão e resumo	1	7
	Perguntas	0	3
	Problemas	0	66
	<b>Total</b>	<b>9</b>	<b>113</b>

**Quadro 3** – Número de trechos que mencionam as palavras quark ou quarks, categorizados

Entidade	Parte do texto	Categoria 1	Categoria 2
Quark	Seções/subseções (corpo do texto)	5	6
	Exemplos	0	1
	Testes	0	0
	Táticas	0	0
	Revisão e resumo	1	4
	Perguntas	0	3
	Problemas	0	9
	<b>Total</b>	<b>6</b>	<b>23</b>



**Quadro 4** – Número de trechos que mencionam as palavras elétron ou elétrons, categorizados

Entidade	Parte do texto	Categoria 1	Categoria 2
Elétron	Seções/subseções (corpo do texto)	24	142
	Exemplos	0	42
	Testes	0	15
	Táticas	0	2
	Revisão e resumo	8	17
	Perguntas	0	53
	Problemas	0	316
	<b>Total</b>	<b>32</b>	<b>587</b>

Observamos nos quadros que os trechos classificados na Categoria 2 são em número maior (em alguns casos muito maior) que aqueles que entraram na Categoria 1. Esses últimos correspondem a 7,4% no caso do fóton, 20,7% no caso do quark e 5,2% no caso do elétron.

Podemos perceber que no caso do quark há relativamente mais menções dentre as classificadas na Categoria 1. Isso é razoável considerando que há mesmo menos possibilidades de “uso” dele em comparação com o fóton e o elétron e, além disso (e talvez por isso), ele foi tratado somente no último capítulo do livro.

De modo geral, os trechos classificados na Categoria 1, quando apareceram, se encontravam quase todos no corpo do texto, na parte principal do capítulo. Em alguns casos, certas descrições também apareceram na revisão (que em parte repetia o que havia sido dito anteriormente). As menções em todas as demais partes dos capítulos (nos exemplos, testes, táticas, perguntas e problemas) eram de usos das entidades, consequentemente entrando na Categoria 2. Somente encontramos uma exceção: no exemplo 38.2 há uma aplicação algébrica que é usada para dar suporte à noção teórica que considera o fóton real. Nesse caso, o trecho entrou também na Categoria 1. Ainda em relação ao corpo da parte principal do capítulo, apesar de ser nele que estavam quase todos os trechos que entraram na Categoria 1, a maioria desse conteúdo também diz respeito a “aplicações” e, consequentemente, entrou na Categoria 2.

O maior número de trechos classificados na Categoria 2 indica que no livro há uma valorização de aplicações e usos das entidades e teorias que lhes dão suporte. Isso se mostra coerente com o que é colocado no prefácio dele, em um trecho que já citamos, que afirma que um de seus objetivos é “ensinar os estudantes a usar o raciocínio para resolver problemas, desde os princípios básicos até a solução final” (Halliday, Resnick & Walker, 2009a, p.xii). Ou seja, a resolução de problemas, e não discussões epistemológicas e ontológicas, é o foco do livro. Essa questão também pode ser percebida por meio do significativo número de menções às entidades nos exercícios algébricos, quase todos classificados na Categoria 2. No projeto editorial do livro esses exercícios são muito valorizados, tanto nos exemplos da parte principal dos capítulos, quanto na parte dos problemas<sup>3</sup>. Eles aparecem como “aplicações” das noções sobre as entidades e das teorias que as sustentam, ou seja, o uso das entidades, sobretudo de equações relacionadas a elas, é feito para resolver algo que foi indagado. Da mesma forma, a parte de perguntas também traz “aplicações” teóricas, tendo em vista que o que se faz é utilizar uma teoria para tratar certa questão.

Um último ponto a ser mencionado é que a Categoria 1 reúne dois tipos de informações: aquelas referentes às justificativas para as entidades serem tomadas como reais e aquelas relacionadas a características dessas entidades. Dessa forma, tendo em vista que ambas estão juntas nos números referentes à Categoria 1, precisamos considerar, mesmo qualitativamente, que as discussões a respeito da realidade das entidades são ainda menores que as mostradas nessa categoria, ou seja, parece que esse tipo de informações tem mesmo pouca relevância no livro.

<sup>3</sup> No livro em análise, o que aparece nos exemplos tem o mesmo formato dos problemas que aparecem na última parte dos capítulos. Inclusive, na versão em inglês do livro (Halliday, Resnick & Walker, 2008), a parte dos exemplos é chamada de *Sample Problem* (amostra ou exemplo de problema), o que em certo sentido mostra que a parte dos *exemplos* possui as mesmas características da parte de *problemas*.

Além dos dados das contagens e categorizações das menções, consideramos importante realizar também descrições qualitativas do tratamento dado pelo livro às três entidades, para investigar os tipos de justificativa utilizados para considerá-las reais. O que será apresentado a seguir.

### Descrições qualitativas

As descrições qualitativas do tratamento dado pelo livro a cada uma das entidades em análise serão apresentadas a seguir, separadamente, começando pelo fóton, passando para o quark e, finalmente, abordando o elétron.

#### *O caso do fóton: a necessidade de uma nova ontologia para o já conhecido*

As menções ao fóton surgem na coleção de livros somente no capítulo 38, cujo título é “Fótons e Ondas de Matéria”, que faz parte do quarto volume da coleção (Halliday, Resnick & Walker, 2009d). Não há menção a ele anteriormente. Na seção 38.2 é feita uma breve introdução sobre grandezas quantizadas e é dito que em 1905 Einstein propôs que a radiação eletromagnética (ou a luz) era também quantizada e que sua quantidade elementar é chamada fóton. Na sequência, os autores afirmam que essa ideia pode parecer estranha, uma vez que em vários capítulos anteriores no livro se discutiu a ideia da luz como uma onda eletromagnética senoidal, uma combinação de campos elétricos e magnéticos alternados. E daí são colocadas as questões: “Como é possível que uma onda composta por campos alternados possa ser encarada como uma quantidade elementar de alguma coisa como o quantum de luz? Afinal, o que é o fóton?” (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.186). A primeira questão parece não estar bem traduzida<sup>4</sup>, mas a ideia apresentada é que parecem incompatíveis as duas descrições do que é a luz: formada por uma quantidade elementar e formada por campos elétricos e magnéticos. A seguir, é dito que o conceito de quantum de luz não é compreendido perfeitamente até hoje e que no livro serão discutidos somente alguns aspectos básicos do conceito de fóton, mais ou menos de acordo com a ideia original de Einstein.

Parece que a tarefa que se busca no livro é uma alteração na ontologia da luz. Até então vista como formada por campos eletromagnéticos, passaria a ser vista também como composta por fótons. Alguns experimentos cuja explicação dos resultados fizeram uso dessa nova entidade são apresentados na sequência no livro, bem como algumas de suas características.

O texto continua, ainda na seção 38.2, apresentando uma expressão para a energia do fóton<sup>5</sup>, apontando que essa energia é transferida para um átomo quando o fóton é absorvido por ele. E quando um fóton é emitido por um átomo, a energia seria transferida do átomo para o fóton criado. Ou seja, uma característica da nova entidade é que ela pode ser criada e aniquilada em interações com átomos. Logo após o texto coloca que

*“Quando discutimos a absorção ou emissão de luz nos capítulos anteriores, os exemplos envolviam uma intensidade luminosa tão grande (ou seja, um número grande de fótons) que não havia necessidade de recorrer à física quântica; os fenômenos podiam ser analisados à luz da física clássica. No final do século XX a tecnologia se tornou suficientemente avançada para que experimentos que envolvem um único fóton pudessem ser executados e o uso de fótons isolados tivesse algumas aplicações práticas. Desde então a física quântica foi incorporada à engenharia, especialmente à engenharia ótica.”* (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.187).

Aqui, de certa forma, é colocada uma questão semelhante à da relação entre mecânica newtoniana e mecânica relativística: nas situações até então tratadas as noções clássicas davam conta dos fenômenos. No caso da luz, não havia necessidade de recorrer a noções de quantização e os fenômenos podiam ser explicados utilizando os conceitos da física clássica. Essa relação entre as duas explicações sobre a luz parece ser trazida como mais um elemento relacionado à construção de uma nova ontologia, além de ser uma justificativa da utilização, até então, da ideia de que luz era formada por ondas eletromagnéticas. Nesse trecho também é explicitado o domínio em que essa nova ontologia se mostrou necessária: nos casos onde estariam envolvidos pouquíssimos fótons.

<sup>4</sup> Na versão em inglês do livro a frase que aparece é “How can this wave of oscillation fields consist of an elementary amount of something – the light quantum? What is a photon?” (Halliday, Resnick & Walker, 2008, p.1058).

<sup>5</sup>  $E = hf$



Já é possível ver que no livro o fóton é apresentado como um constituinte do mundo, como um elemento que faz parte de como as coisas são, mas que não teria sido observado anteriormente por uma espécie de limitação tecnológica. Transparece uma noção realista a respeito do fóton, uma noção que coloca que ele sempre esteve lá, mas só não havia ainda sido detectado.

Em seguida, na página 188 (seção 38.3), o livro passa a tratar do efeito fotoelétrico, colocando que ele não pode ser compreendido à luz da física clássica. São apresentados experimentos básicos, envolvendo o referido efeito, cujos resultados poderiam ser explicados ao se pensar a luz em termos de fótons. A equação do efeito fotoelétrico<sup>6</sup> aparece na sequência (subseção 38.3.3), sendo dito que ela é um resumo feito por Einstein dos resultados dos experimentos sobre o efeito fotoelétrico.

De um modo geral, aparece no livro a ideia de que considerar que a luz é quantizada seria uma forma de explicar aquilo que foi observado nos experimentos. Ou seja, a existência do fóton aparece aqui na forma de uma *inferência abductiva*. De acordo com Chibeni (1996), nesse tipo de inferência o poder explicativo de uma hipótese parece fornecer bases para crermos em sua verdade. Segundo Peirce (*apud* Chibeni, 1996, p.46), “o fato surpreendente, C, é observado. Mas se A fosse verdade, C seria um fato natural. Logo, há razões para suspeitar que A seja verdade”. Dessa forma, se os fótons forem reais, os resultados experimentais obtidos poderiam ser explicados, aparecendo, dessa forma, a necessidade dos fótons para a validade dessa explicação.

No entanto, apesar de introduzir a necessidade do fóton, o livro traz também a seguinte frase:

*“A explicação do efeito fotoelétrico certamente requer o uso da física quântica. Durante muitos anos a explicação de Einstein também foi considerada como um argumento decisivo para a existência dos fótons. Em 1969, porém, foi proposta uma explicação alternativa para o fenômeno que utiliza a física quântica mas dispensa a ideia de fótons. Os fótons **realmente** existem, mas hoje se sabe que a explicação proposta por Einstein para o efeito fotoelétrico não pode ser considerada uma prova da existência dos fótons.”* (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.190, grifo dos autores).

Essa frase relativiza a inferência que no livro dá origem ao conceito de fóton. Parece que em uma tentativa de correção histórico-conceitual, apresentando uma explicação alternativa para o efeito fotoelétrico<sup>7</sup>, o livro, de certa forma, deixa a inferência da existência do fóton sem sustentação explícita, a não ser pela simples afirmação da sua existência. E essa afirmação é até realçada por meio do termo “realmente”, que aparece grifado. Além disso, cabe mencionar que esse trecho trata de maneira bastante superficial o processo histórico de diálogo entre teoria e referencial empírico, que marca o processo de construção das teorias da ciência, o que também não contribui para o entendimento das formas pelas quais o fóton foi sendo considerado real.

Apesar dessa colocação do livro, que relativiza o tipo de justificativa apresentado para a existência do fóton, logo em seguida aparecem novamente explicações onde a existência do fóton se faz necessária. Um próximo ponto, que traz essa necessidade para as explicações, é apresentado por meio de um exemplo (exemplo 38.2, p.190 do quarto volume). Nele é indicado o cálculo do tempo que um elétron levaria para ser ejetado de um material, caso fosse transferida para ele energia por meio de uma fonte luminosa, considerando uma transferência contínua, ou seja, a luz se comportando como uma onda clássica. O cálculo chega a um valor muito alto – aproximadamente 1,3h –, quando, segundo o livro, o resultado observado em uma situação prática é de 10<sup>-9</sup>s. Esses resultados corroborariam a ideia que a matéria recebe a energia da luz de acordo com o conceito de quantum de luz, e não de forma contínua. Aqui, novamente, é mostrada uma situação cuja explicação não poderia ser feita por meio da ontologia das ondas eletromagnéticas, enfatizando novamente a necessidade da existência do fóton.

O texto, na sequência, passa para outro tópico, sobre o momento linear dos fótons (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.191, subseção 38.4.0). É dito que Einstein ampliou o conceito de fóton ao propor que o

---

<sup>6</sup>  $hf = K_{max} + 0$

<sup>7</sup> Aqui parece estar sendo feita referência ao trabalho de Lamb e Scully (1969), que mostrou que era possível interpretar o efeito fotoelétrico por meio da quantização dos estados eletrônicos, e não da luz. Ou seja, não era necessário o conceito de fóton para a explicação do efeito fotoelétrico. No entanto, para explicações de fenômenos como a radiação de corpo negro ou o espalhamento Compton, o fóton ainda era necessário.



quantum de luz possui momento linear. É apresentada a expressão para o momento de um fóton<sup>8</sup> e é dito que, ao interagir com a matéria, além de energia o fóton também transfere momento, como se essa interação pudesse ser considerada uma colisão clássica. Em seguida é apresentado o experimento realizado por Arthur Compton, que, segundo o livro, confirmou que os fótons possuem energia e momento. Também é dito que os resultados do experimento constituem um mistério para a física clássica, mas puderam ser explicados ao se utilizar o conceito de luz quantizada, além das leis de conservação de energia e de momento. São feitas algumas manipulações matemáticas e chega-se à expressão para o chamado deslocamento Compton<sup>9</sup>.

Nesse caso, assim como foi feito inicialmente com o efeito fotoelétrico, pensar a luz em termos de fótons, e que esses possuem momento, aparece como a melhor explicação para o fenômeno observado no experimento. Novamente é realizada uma inferência abductiva.

No entanto, a caracterização da luz como composta por fótons traz alguns problemas, uma vez que até então, no livro, ela foi tratada como onda eletromagnética, apresentando um comportamento ondulatório. Dessa forma, o livro apresenta, na sequência, um tratamento da luz considerando o conceito de quantização e, em alguns trechos, traz mais características dos fótons.

O livro continua com a apresentação de um novo tópico, tratando a luz como uma onda de probabilidade (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.194, seção 38.5). Os autores começam dizendo, na subseção 38.5.0, que:

*“Um dos grandes mistérios da física é o fato de a luz se comportar como uma onda (ou seja, como um fenômeno não localizado) na física clássica e, ao mesmo tempo, ser emitida e absorvida através de entidades discretas chamadas fótons (ou seja, como um fenômeno localizado) na física quântica.”*

Em seguida é colocado que, para compreender melhor esse dualismo, discutir-se-á três versões de um experimento de fenda dupla que havia sido apresentado anteriormente no livro (Experimento de Young). Na seção em que esse experimento foi apresentado inicialmente, foi dito que a presença de franjas de interferência que aparecem no experimento era prova da natureza ondulatória da luz (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.82, seção 35.4). Mas agora, ao tratar de fótons, seria necessária uma relativização da própria afirmação e a reinterpretação do experimento que levou à frase citada.

Para tanto, foi apresentada, na subseção 38.5.1, a seguinte situação: se um detector de fótons, que emitiria um sinal sonoro ao detectar uma dessas partículas, fosse colocado na região que aparecem as franjas de interferência, ele iria apresentar mais ou menos sinais sonoros de acordo com os máximos e mínimos da figura de interferência. Ou seja, haveria uma diferença no número de sinais sonoros por unidade de tempo nas diferentes regiões. Além disso, é dito que nessa situação a detecção de um fóton em um determinado ponto não apresentaria regularidade, mas que seria possível calcular a probabilidade relativa de que um fóton seja detectado em um certo ponto durante um intervalo de tempo especificado, com essa probabilidade sendo proporcional à intensidade da luz incidente nesse ponto. Vemos aqui a construção de uma situação para, novamente, ser possível uma mudança na ontologia da luz sem descaracterizar aquilo que foi dito sobre ela anteriormente, a respeito de sua natureza ondulatória.

Na sequência, após a descrição dessa situação, os autores utilizam uma expressão obtida antes para a intensidade de uma onda luminosa, que em qualquer ponto do espaço é proporcional ao quadrado da amplitude do campo elétrico associado à onda no mesmo ponto<sup>10</sup>, e a reinterpretem, dizendo que

*“A probabilidade (por unidade de tempo) de que um fóton seja detectado em um pequeno volume com o centro em um dado ponto de uma onda luminosa é proporcional ao quadrado da amplitude do campo elétrico associado à onda no mesmo ponto.”* (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.195).

Para os autores, essa descrição probabilística de uma onda luminosa é outra forma de encarar a luz, que pode ser vista não só como uma onda eletromagnética, mas também como uma onda de probabilidade. Aqui, novamente, há um processo de alteração da ontologia da luz, passando de uma onda

<sup>8</sup>  $p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$

<sup>9</sup>  $\Delta\lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \phi)$

<sup>10</sup> A expressão apresentada é  $I = \frac{1}{c\mu_0} E_{rms}^2$ , onde  $E_{rms}$  é o valor médio quadrático do campo elétrico e é definido como  $E_{rms} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}}$ .



eletromagnética para uma onda que define a probabilidade com que fótons possam ser encontrados em uma determinada região. Há, dessa forma, uma descrição ontológica da luz que utiliza os fótons, mas em certo sentido mantém sua natureza ondulatória.

A seguir, o livro descreve uma versão para fótons isolados do experimento de Young (subseção 38.5.2), onde a fonte luminosa emite apenas um fóton por vez, em intervalos aleatórios, e que, em um tempo suficientemente longo, as mesmas franjas de interferência são encontradas. Aqui surge um ponto interessante do livro em que é colocada a questão de uma possível explicação para esse resultado. É dito que

*“Antes mesmo de começarmos a pensar em uma explicação temos vontade de fazer perguntas como as seguintes: se os [fótons]<sup>11</sup> passam pelo equipamento um de cada vez, por qual das fendas do anteparo B passa um dado fóton? Como um fóton pode ‘saber’ que existe outra fenda além daquela pela qual passou, uma condição necessária para que a interferência existe? Será que um fóton pode passar pelas duas fendas ao mesmo tempo e interferir com ele mesmo?”* (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.195).

Esses questionamentos chamam atenção para o fato de que a ontologia puramente corpuscular da luz não pode responder a contento ao resultado desse experimento. Traz a dificuldade em se estabelecer uma ontologia que dê conta de explicações para todos os fenômenos envolvendo a luz.

Na sequência, o livro aponta que só se conhece a existência de fótons por meio de sua interação com a matéria e que, no caso do experimento relatado, não se tem informação sobre o que acontece durante o percurso dele da fonte luminosa até a tela onde aparecem as franjas de interferência. A seguir caracteriza de forma especulativa a ontologia da luz, apresentando uma nova característica dos fótons, nos seguintes termos:

*“[...] como uma figura de interferência aparece na tela podemos especular que cada fóton se propaga da fonte até a tela **como uma onda**, que preenche todo o espaço entre a fonte e a tela e depois desaparece quando o fóton é absorvido em algum ponto da tela, transferindo energia e momento para a tela neste ponto.”* (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.195, grifos dos autores).

É dito que não se pode prever onde o fóton será detectado, mas somente a probabilidade de que essa detecção ocorra em um determinado ponto. E que a onda que se propaga da fonte luminosa até a tela é uma onda de *probabilidade*, que produz na tela uma figura composta por “franjas de probabilidade”.

O texto continua (subseção 38.5.3), colocando que físicos tentaram interpretar o resultado do experimento com fótons isolados em termos de pequenos pacotes de ondas clássicas que passariam simultaneamente pelas duas fendas, mas que experimentos recentes revelaram que o fenômeno da interferência não pode ser explicado dessa forma.

Praticamente finalizando a discussão sobre a ontologia da luz, o texto apresenta outro experimento com fótons isolados. Nesse experimento, existiria uma molécula que pode emitir fótons em intervalos bem espaçados e duas possíveis direções de emissão desses fótons foram escolhidas para a análise, direções essas espaçadas quase 180° uma da outra. Isso impediria que uma eventual interferência se desse devido à proximidade das duas trajetórias (diferente do experimento de Young em que o ângulo entre as duas possíveis trajetórias dos fótons que chegam às duas fendas era pequeno). Dois espelhos foram posicionados nas duas possíveis trajetórias, refletindo os fótons que as percorreriam até um terceiro espelho, semitransparente, que pode combinar a luz que chega das duas trajetórias. Assim, pode haver interferência da luz que percorre uma trajetória com a luz que percorre a outra e, depois disso, o feixe é direcionado para um detector. Esse espelho semitransparente poderia ser deslocado de modo a modificar as distâncias percorridas pelos fótons das duas trajetórias, mudando dessa forma a diferença de fase da luz que chega ao detector, fazendo com que máximos e mínimos de interferência apareçam no sinal de saída do detector.

No entanto, considerando que no experimento em questão as duas possíveis trajetórias são percorridas por um único fóton de cada vez, o livro faz o seguinte questionamento: “Como pode um fóton se propagar ao longo de dois percursos quase diametralmente opostos, de modo a interferir com ele mesmo?” (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.196). Essa pergunta levanta a questão de que a consideração da luz

<sup>11</sup> No texto a palavra que aparece aqui é “*élétrons*”. No entanto percebe-se que há um erro na versão brasileira do livro, uma vez que essa palavra não faria sentido nessa frase e, além disso, na versão em inglês o termo que aparece é fótons.



como formada somente por pequenos corpúsculos não consegue explicar o resultado do experimento. Assim, o livro continua apontando que

*“A explicação está no fato de que quando uma molécula emite um fóton uma onda de probabilidade se propaga em todas as direções; o que o experimento faz é simplesmente colher amostras dessa onda em duas dessas direções e combiná-las na posição do detector.”* (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.196).

E continua:

*“Os resultados das três versões do experimento de dupla fenda podem ser explicados se supusermos (1) que a luz é gerada na forma de fótons, (2) que a luz é detectada na forma de fótons, (3) que a luz se propaga na forma de uma onda de probabilidade.”* (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.196).

Dessa forma, o texto encerra sua caracterização sobre a ontologia da luz de modo a poder explicar os fenômenos relacionados a ela. Percorreu-se uma trajetória com a luz sendo tratada, inicialmente, como ondas eletromagnéticas, passando, ao final, a ser considerada como um ente com comportamento corpuscular, mas que se propaga na forma de ondas de probabilidades.

A partir desse momento do livro, com a nova ontologia descrita, os fótons são tratados como um elemento conhecido e passam a ser utilizados na explicação de outros fenômenos, bem como em diversos problemas algébricos.

#### *O caso do quark: o aparecimento de uma nova entidade para uma nova explicação*

Enquanto o conceito de fóton aparece no livro somente no capítulo que tratou dele especificamente, o quark é mencionado algumas vezes antes do capítulo específico que o aborda. Talvez isso se dê porque o fóton corresponde a uma ontologia concorrente à ontologia ondulatória, com a qual a luz estava sendo apresentada até então. Já no caso do quark, não há no livro nada que concorra com ele.

A primeira vez que o quark é mencionado é no capítulo 21 (seção 21.5), primeiro capítulo do terceiro volume, que trata de cargas elétricas. Ao apontar que a carga é quantizada, o livro coloca que

*“A carga elementar  $e$  é uma das constantes mais importantes da natureza. Tanto o elétron quanto o próton possuem uma carga cujo valor absoluto é  $e$  [...]. (Os quarks, partículas elementares dos quais são feitos os prótons e nêutrons, têm cargas de  $\pm e/3$  ou  $\pm 2e/3$ , mas existem fortes indícios de que não podem ser observados isoladamente. Por esse motivo e por razões históricas, a carga elementar não é tomada como sendo  $e/3$ ).”* (Halliday, Resnick & Walker, 2009c, p.12).

O quark é apresentado aqui como componente de prótons e nêutrons, além de ser feita menção sobre sua carga e ao fato de que ele não pode ser observado de forma isolada. Após esse trecho, o quark aparece novamente em alguns exercícios, mas sua presença não é questão relevante, mas sim a carga elétrica. Além disso, são feitas menções a quarks no capítulo 28 (subseção 28.7.0) e no capítulo 42 (subseção 42.3.8)<sup>12</sup>, usando o que já havia sido abordado sobre eles no trecho citado anteriormente.

Em todos esses casos mencionados, o quark é sempre citado como um elemento que faz parte da natureza, como um constituinte da matéria, com o livro deixando claro seu caráter real como uma partícula que compõe os prótons e nêutrons.

Apesar de essas menções a respeito do quark terem aparecido no livro, o capítulo que trata especificamente dele é o capítulo 44, o último da coleção. Nesse capítulo, cujo título é “Quarks, Léptons e Big Bang”, inicialmente é feita uma abordagem sobre algumas partículas, mencionando o modelo padrão, e apresentando algumas propriedades delas. Para a análise das interações entre elas, são levadas em conta leis de conservação, como as leis de conservação da energia, do momento linear, do momento angular e da carga elétrica, e é dito que também são consideradas outras leis de conservação que ainda não haviam sido

<sup>12</sup> Esses trechos foram classificados na Categoria 2.



discutidas. As menções a todas as partículas são feitas sempre afirmando que elas foram descobertas<sup>13</sup>. Também se descreve um evento experimental (uma aniquilação próton-antipróton em uma câmara de bolhas) para indicar a forma pela qual é feita a análise experimental de partículas, utilizando leis de conservação.

Mais à frente, nas seções em que são tratados especificamente os léptons e hádrons<sup>14</sup> (seções 44.4 e 44.5), apesar de os quarks não serem citados, aparecem elementos importantes para a discussão posterior sobre eles. Nessas seções são introduzidas novas leis de conservação: a lei de conservação dos números leptônicos, no caso de interações envolvendo léptons, e a lei de conservação dos números bariônicos, no caso das interações envolvendo hádrons. No caso dos números leptônicos, é dito que, de acordo com experimentos, eles seriam conservados em todas as interações (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.368); para os números bariônicos é dito que as únicas reações possíveis são aquelas em que o número bariônico permanece constante (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.369).

Apesar de não dito explicitamente, esses novos números e a conservação deles foram surgindo justamente na tentativa de explicar a razão de certas reações entre partículas ocorrerem e outras não. Isso fica claro quando na página 371 (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.371, seção 44.6) são apresentadas duas reações e afirmado que uma delas nunca era observada, mesmo não violando nenhuma das leis de conservação discutidas até então. Com isso, para explicar esse comportamento inesperado, Murray Gell-Mann, nos Estados Unidos, e K. Nishijima, no Japão, propuseram, de forma independente, que certas partículas possuem ainda outra propriedade, que foi chamada de *estranheza*<sup>15</sup>, a qual está associado um número quântico e uma lei de conservação, a lei da conservação da *estranheza*. O livro afirma que, com passar do tempo, a *estranheza* passou a ser aceita como um atributo tão fundamental quanto a carga e o spin.

Vemos que vai sendo construída a ideia de que certas propriedades das partículas, até então desconhecidas, precisavam ser levadas em consideração para se explicar aquilo que era observado. E daí surgiram novas leis de conservação. A existência dessas propriedades seria a melhor forma de explicar certos comportamentos, o que é, novamente, uma inferência abdução. No entanto, o livro coloca que essas propriedades foram descobertas, enfatizando uma posição realista. Vemos que a ontologia das partículas vai se alterando conforme novas propriedades são apresentadas.

Cabe mencionar que o quark quase não é citado até o capítulo 44. Muitas das descrições que fizemos até aqui são de trechos que não entraram nas Categorias, justamente pelo quark não ser citado. No entanto, são importantes para o entendimento das partes seguintes que tratam dele.

O texto passa, na sequência (seção 44.7), a discorrer sobre o que foi chamado de Caminho Óctuplo, que é um padrão que surge quando a *estranheza* dos oito bárions de spin 1/2 é plotada em função da carga, usando, para essa última, um eixo inclinado. Seis dos oito bárions formam um hexágono com os dois bárions restantes no centro (o nome caminho óctuplo está relacionado com o número de bárions). Algo semelhante acontece com os mésons quando a *estranheza* dos nove mésons de spin zero é plotada em função da carga (usando aqui também um eixo inclinado), com seis deles formando um hexágono e, os três restantes, no centro. O livro coloca que esses gráficos e outros semelhantes foram propostos independentemente por Murray Gell-Mann e Yuval Ne'eman, em 1961, e “são representativos de um número maior de padrões simétricos nos quais os bárions e mésons podem ser agrupados” (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.372).

Já para os bárions de spin 3/2 é formado um padrão como os pinos de um jogo de boliche. Quando ele foi proposto, somente nove desses bárions eram conhecidos, faltando o “pino da frente”, e o livro aponta que em 1962 Gell-Mann, guiado pela teoria e pela simetria do padrão, previu a possibilidade de ser encontrada mais uma partícula com determinadas características para completar o padrão, o que se deu posteriormente.

Temos aqui apresentada a ideia de que, por meio da *estranheza*, que é uma propriedade que surgiu para explicar ocorrências de certas reações e de outras não, foi possível verificar um padrão nos bárions e mésons. Com isso, teria sido possível antever a descoberta de uma nova partícula. Em certo sentido, a questão de uma construção teórica antecipar a descoberta de uma partícula é um fator usado pelo livro para

<sup>13</sup> Há uma exceção para uma menção ao neutrino. Na página 360 (Halliday, Resnick & Walker, 2009d) ao invés de ser dito que ele foi descoberto, é dito que foi postulado por Enrico Fermi para explicar o decaimento beta.

<sup>14</sup> Classificação das partículas de acordo com o efeito da interação forte sobre elas. Partículas sujeitas à interação forte são chamadas hádrons e as que não estão sujeitas são os léptons. Os hádrons são classificados ainda em bárions e mésons.

<sup>15</sup> “O nome *estranheza* se deve ao fato de que as partículas com essa propriedade, que não está presente nas partículas comuns, eram chamadas de ‘partículas estranhas’, e o nome pegou.” (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.371).



expressar uma concepção realista, quando é dito que “nada como uma comprovação experimental para aumentar a credibilidade de uma teoria!” (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.373).

Na sequência o livro coloca que

*“O caminho óctuplo fez pela física de partículas o que a tabela periódica fez pela química. Nos dois casos existe um padrão bem definido no qual certas lacunas (partículas ou elementos faltantes) se destacam claramente, guiando os experimentadores em suas buscas. A própria existência da tabela periódica sugere que os átomos dos elementos não são partículas fundamentais, mas possuem uma estrutura interna. Da mesma forma, os padrões do caminho óctuplo podem ser considerados uma indicação de que os bárions e mésons possuem uma estrutura interna que é responsável pela regularidade de suas propriedades. Essa estrutura pode ser descrita pelo **modelo dos quarks**, que será discutido a seguir.”* (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.373, grifo dos autores)

O trecho indica como a ideia da existência de partículas que compõem os bárions e mésons se mostrou plausível por meio de indicações indiretas, em uma analogia com a tabela periódica. Ou seja, aparece a indicação de que considerar uma nova ontologia para bárions e mésons, considerando serem formados por outras partículas até então desconhecidas, é uma necessidade para a explicação daquilo que é observado. E assim teria surgido o modelo dos quarks.

Para explicar os padrões do caminho óctuplo, o livro apresenta logo em seguida uma seção com o título “Modelo dos Quarks” (seção 44.8). Em seu início, na subseção 44.8.0, é dito que

*“Em 1964, Murray Gell-Mann e George Zweig observaram<sup>16</sup> independentemente que os padrões do caminho óctuplo podiam ser explicados se os bárions e mésons fossem feitos de partículas menores que Gell-Mann chamou de **quarks**.”* (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.373, grifo dos autores).

Ou seja, o livro mostrou porque foi necessário considerar a existência dessas novas partículas, até então desconhecidas, como componentes da matéria. Assim como no caso dos fótons, a existência dos quarks aparece como necessária para que sejam possíveis certas explicações, ou seja, a entidade é assumida como real pois assim se torna possível explicar determinados fenômenos. Feito isso, a partir desse ponto, o livro passa a caracterizar melhor essas partículas e usá-las em outras explicações, como na caracterização de bárions e mésons. É feita também uma breve abordagem sobre a interação forte, que mantém os quarks unidos, bem como os prótons e nêutrons, para formar os núcleos dos átomos.

Como não havia uma ontologia concorrente, como no caso da luz, parece que a apresentação dos quarks pôde ser mais direta que a dos fótons. Apesar de ser apresentado como uma construção teórica que permitiu a explicação de certos fenômenos, o caráter real dos quarks é sempre enfatizado.

Em seguida é dito que o livro inicialmente se concentrará nos três quarks mais leves (*up*, *down* e *estranho*) e que seus nomes, como os dos demais, são totalmente arbitrários, sendo chamados de sabores.

Mais à frente no texto é falado que o fato de o número de carga dos quarks ser fracionário explica muito bem as cargas inteiras dos mésons e dos bárions e que os quarks estão sempre combinados em pares ou trios, por razões ainda não totalmente compreendidas, formando partículas cujo número quântico de carga é nulo ou inteiro. No entanto, é citado que uma notável exceção foi observada em experimentos realizados no Brookhaven National Laboratory<sup>17</sup>, onde foi formado, por alguns instantes, um gás de quarks isolados, e

<sup>16</sup> A palavra utilizada aqui para dizer que o modelo explica o padrão foi “observaram”, um termo que pode levar ao entendimento de que o padrão está na natureza, passível de observação, e não foi uma construção elaborada para a explicação. No entanto, esse termo se encontra somente na tradução para o português do livro, na versão em inglês a expressão que aparece é *pointed out* (Halliday, Resnick & Walker, 2008, p.1231). O termo “observaram”, da versão brasileira do livro, pode ter sido usado como o sentido de “apontaram”, mas deixa a ideia meio ambígua, uma vez que também pode trazer o sentido literal de observação, como “algo visto”. E isso é um fator que pode contribuir para reforçar uma concepção realista ingênua a respeito do modelo dos quarks.

<sup>17</sup> Brookhaven National Laboratory é um laboratório localizado em Upton, Nova Iorque, Estados Unidos.



afirma-se que “nesses experimentos os quarks podem ter existido isoladamente pela primeira vez desde que o universo começou”<sup>18</sup> (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.374).

Essa menção diz respeito aos experimentos realizados no RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider* ou Colisor Relativístico de Íons Pesados), um acelerador de partículas que permite colidir íons com velocidades próximas à da luz e criar um plasma de quarks e glúons livres (ou o gás de quarks isolados, como mencionado no Halliday), a densidades e temperaturas muito altas, mas com duração muito pequena. Hoje em dia isso também é realizado no LHC (*Large Hadron Collider* ou Grande Colisor de Hádrons). A detecção desse plasma se dá de maneira indireta.

Na sequência no livro (subseções 44.8.1, 44.8.2, 44.8.3), os quarks são utilizados para outras explicações (esses trechos foram classificados na Categoria 2). Na página 374 são mostradas combinações de quarks, para formar algumas bárions, e de quarks e antiquarks, para formar mésons. Na página 375 é usado o modelo dos quarks para uma nova interpretação do decaimento beta.

Em seguida é iniciada uma subseção chamada “Outros Quarks” (44.8.4), que trata dos quarks *charme*, *top* e *bottom* (essa subseção sim foi classificada na Categoria 1). O livro coloca que é preciso postular a existência de mais três quarks (*charme*, *top*, *bottom*) para explicar outras partículas e outros padrões no caminho óctuplo que não foram discutidas. Esse é um padrão que veio se repetindo até aqui, uma entidade é tomada como real pois, por meio de sua existência, se torna possível a explicação de algo. É dito também que, devido às massas desses quarks serem muito elevadas, as partículas que contêm esses quarks são geradas apenas em colisões de altas energias e, por isso, só foram observadas a partir da década de 1970.

Na seção seguinte do livro, 44.9, são tratadas de interações fundamentais. No caso da interação entre quarks (subseção 44.9.4), é dito que a força que os une é a interação forte e que, de acordo com a teoria que trata dessa interação, cada sabor de quark pode ser encontrado em três tipos, que foram chamados de “cores” (vermelho, verde e azul). O mesmo para antiquarks (ciano, magenta e amarelo). Apesar de as “cores” dos quarks não terem relação com cores reais, é dito que utilizar esse conceito possui lógica, pois os experimentos mostrariam que os quarks somente se unem em combinações que sejam “neutras” em relação à cor, em uma analogia com cores verdadeiras. Ou seja, é necessária a união das três cores primárias (três quarks com essas cores) para formar um bárion ou de uma cor primária e a cor complementar (quark e antiquark com cores complementares) para formam um méson. Por fim, afirma-se que a força da cor não mantém unidos somente os quarks, mas também prótons e nêutrons para formar os núcleos. Nesse caso, isso é chamado de interação nuclear.

Vamos aqui, novamente, uma característica ser postulada (as “cores”) para se explicar o porquê dos quarks somente se unirem em certas combinações e não em outras. Ou seja, essa nova característica surge, mais uma vez, por meio de uma inferência abductiva.

#### *O caso do elétron: uma entidade já conhecida*

O elétron é uma partícula mais conhecida que o fóton ou o quark. Na coleção de livros, ele também aparece mais que as outras duas. Já no primeiro volume (Halliday, Resnick & Walker, 2009a) ele é mencionado em diversas ocasiões. Na subseção 1.7.1, encontramos referência ao elétron em uma tabela que apresenta sua massa junto com a de vários outros corpos, ocasião em que é feita uma discussão sobre massa (menção que entrou na Categoria 1). Aparece como exemplo de um “objeto” pontual no capítulo sobre movimento (seção 2.2), em diversos problemas que tratam de movimento, posição e deslocamento (2.16, 2.23, 2.27, 4.3, 4.6, 4.93, 4.113, 4.124). É utilizado como um exemplo de um corpo cujas dimensões são tão pequenas que a mecânica newtoniana deve ser substituída pela mecânica quântica (seção 5.2), mesmo com uma afirmação dessas merecendo um pouco mais de cuidado, já que mais à frente no livro o elétron aparece em exercícios em que deve ser utilizada a mecânica newtoniana (5.29, 5.104, 9.100, 9.111, 9.127).

No segundo volume da coleção de livros, o elétron aparece em uma discussão sobre tipos de ondas, onde são citadas as ondas de matéria, associadas a elétrons e outras partículas (seção 16.2), mas sem nenhuma explicação adicional. Adiante, ao se tratar do princípio da superposição de ondas, é dito que “os elétrons presentes nas antenas dos receptores de rádio e televisão são colocados em movimento pelo efeito combinado das ondas eletromagnéticas de muitas estações” (Halliday, Resnick & Walker, 2009b, p.129, seção 16.9). Ao ser tratado o tema da condução térmica, afirma-se que em uma panela no fogo os átomos e elétrons que a compõem passam a vibrar intensamente devido à temperatura a que são expostos e a vibração

<sup>18</sup> Esta frase está com um sentido ambíguo. O que parece estar sendo dito é que condições para a existência de quarks isolados, que existiriam na época da formação do universo, foram possibilitadas pelo experimento.

dos átomos gera a condução térmica (subseção 18.12.1). Existe também um problema em que é pedido para ser calculada a velocidade quadrática média dos elétrons livres na superfície do sol (19.22). Nenhuma dessas menções entrou na Categoria 1.

É no terceiro volume da coleção, dedicado ao estudo do eletromagnetismo, que o elétron passa a ser mencionado com mais frequência. Esse volume começa tratando de cargas elétricas, afirmando que esse tipo de carga “é uma propriedade intrínseca das partículas fundamentais de que é feita a matéria; em outras palavras, é uma propriedade associada à própria existência dessas partículas” (Halliday, Resnick & Walker, 2009c, p.2).

O texto continua apresentando cargas elétricas, características de materiais condutores e isolantes etc. Na subseção 21.3.0, o elétron é apresentado da seguinte forma:

*“As propriedades dos condutores e não-condutores se devem à estrutura e à natureza elétrica dos átomos. Os átomos são formados por três tipos de partícula: os **prótons**, que possuem carga elétrica positiva, os **elétrons**, que possuem carga elétrica negativa, e os **nêutrons**, que não possuem carga elétrica. Os prótons e nêutrons ocupam a região central do átomo conhecida como **núcleo**.”* (Halliday, Resnick & Walker, 2009c, p.4, grifo dos autores).

Após esse trecho, fala-se mais um pouco sobre as características do elétron, mas, da mesma forma que no fragmento citado, simplesmente citando suas características. Por esse trecho, e pelas demais vezes que o elétron apareceu anteriormente na coleção de livros, vemos que sua apresentação não ocorre da mesma maneira que a do fóton ou do quark. Enquanto esses últimos apareceram como necessários para que fossem possíveis certas explicações, mesmo sendo enfatizado seu caráter real, o elétron é simplesmente tratado como componente do átomo, sem esclarecimentos adicionais. Ou seja, enquanto para o fóton e para o quark os autores criam um contexto de necessidade, legitimando a introdução de ambas as entidades, no caso do elétron sua existência é tomada como um *a priori*. Seu caráter real é considerado auto evidente. Tanto que, antes mesmo de ser caracterizado, ele já fora usado em diversas situações no livro.

A partir do trecho do livro acima apresentado, as cargas dos materiais passam a ser tratadas em termos de prótons e elétrons, que possuem o mesmo valor absoluto e sinais opostos. Por meio dos elétrons são explicados os materiais condutores e não-condutores, cargas induzidas, força eletrostática e assim por diante. E todo o eletromagnetismo é apresentado considerando que o elétron é uma partícula que compõe a matéria.

Ainda sobre a carga elétrica, ela é apresentada como quantizada, na seção 21.5, por meio do seguinte trecho:

*“Na época de Benjamin Franklin, a carga era considerada um fluido contínuo, uma ideia que foi útil para muitos propósitos. Hoje, porém, sabemos que mesmo os fluidos “clássicos”, como a água e o ar, não são contínuos e sim compostos de átomos e moléculas; a matéria é quantizada. Os experimentos revelam que o “fluido elétrico” também não é contínuo, e sim composto de unidades elementares de carga.”* (Halliday, Resnick & Walker, 2009c, p.12)

Aqui se diz que experimentos revelam que a carga é quantizada (mais à frente no livro é descrito de forma sucinta o experimento de Millikan para medição da carga elementar *e*). Na sequência é apresentado o valor da carga do elétron (esse trecho foi apresentado na página 243 do presente trabalho, no início da seção que tratamos do quark). Ou seja, as propriedades do elétron são apresentadas da mesma forma que ele mesmo o foi, sem esclarecimentos adicionais. São consideradas como reais, assim como o próprio elétron.

Na seção “O que Produz um Campo Magnético?” (seção 28.2), mais uma propriedade do elétron é apresentada. Após apontar que um campo magnético pode ser produzido por meio do movimento de partículas eletricamente carregadas, é dito que

*“A outra forma de produzir campos magnéticos é usar partículas elementares como os elétrons, que possuem um campo magnético intrínseco. O campo magnético é uma propriedade básica de muitas partículas elementares, do mesmo modo como a massa e a carga elétrica (quando existem) são propriedades básicas.”* (Halliday, Resnick & Walker, 2009c, p.202).



Novamente, temos aqui outro exemplo de como as propriedades do elétron são apresentadas.

De um modo geral, o elétron aparece no livro como um elemento que dá sustentação a muitas explicações. Mas ele não surge de alguma inconsistência nas formas tratar o mundo físico, nem é apresentado como algo necessário para permitir certas explicações que de outra forma não poderiam ser feitas, mas sim como um componente já conhecido da matéria. Ou seja, ele foi considerado, desde o início, como parte da natureza, sem ter havido uma apresentação mais cuidadosa, talvez por ser supostamente uma partícula estudada com mais frequência nos anos anteriores de escolarização. Suas características são descritas diretamente, em termos de massa, carga ou campo magnético intrínseco, sem justificativa ou menção ao surgimento/descoberta dessas propriedades. Todas aparecem como propriedades intrínsecas de uma partícula que existe na natureza. Além disso, o elétron faz parte de uma rede de conceitos, muitos dos quais foram apresentados no livro, o que faz com que ele se mostre indispensável para a física. O elétron aparece nas explicações de uma imensa variedade de fenômenos.

No entanto, mesmo após algumas das propriedades do elétron terem sido tratadas e ele ter sido utilizado em uma série explicações, o livro apresenta uma seção com o título “Campos cruzados: a Descoberta do Elétron” (seção 28.4). Os autores definem campos cruzados como campos elétricos e magnéticos perpendiculares entre si e passam a discutir o que ocorre quando uma partícula com carga elétrica se move em uma região na qual existem campos cruzados. Para tanto, o livro se baseia no experimento de J.J. Thomson, considerado como a descoberta do elétron, em 1897. O texto apresenta um tubo de raios catódicos e explica brevemente seu funcionamento (uma versão moderna e simplificada do equipamento experimental utilizado por Thomson) e mostra como Thomson chegou na razão  $m/|q|$  das partículas investigadas, ou seja, os elétrons. É dito, em seguida, que

*“Thomson afirmou que essas partículas estavam presentes em todas as formas de matéria e eram mais de 1000 vezes mais leves que o átomo mais leve conhecido (o átomo de Hidrogênio). [...] A medição de  $m/|q|$ , combinada com as duas afirmações de Thomson, é considerada como ‘a descoberta do elétron’.” (Halliday, Resnick & Walker, 2009c, p.208).*

No entanto, o que vemos é que a menção sobre a descoberta do elétron parece ter sido usada não como uma discussão a respeito de sua existência, mas como meio para a tratar do comportamento do elétron sob a ação dos campos cruzados. Isso porque conhecer esse comportamento é importante para a explicação do Efeito Hall, tratado na sequência do livro. Ou seja, apesar de o experimento de Thomson ter sido importante na caracterização do elétron, e de sua realidade, isso não pareceu ser o ponto central da discussão, ficando essas questões somente implícitas.

Outras propriedades do elétron (como momento de dipolo magnético, spin etc.), bem como explicações que fazem uso dessas propriedades, seguem o mesmo padrão no livro, apresentadas sem muita problematização e sendo aplicadas de forma instrumental (como nas seções 28.10 e 32.7)<sup>19</sup>. O elétron é considerado como uma partícula conhecida, com algumas propriedades e explicações derivadas.

No entanto, existe uma mudança no quarto volume da coleção, na seção 38.6, “Elétrons e Ondas de Matérias”. Nessa seção, a apresentação do elétron passa por uma mudança profunda, com uma alteração em sua ontologia. A referida seção sucede aquela que tratou da luz como uma onda de probabilidade, que explicava a natureza dual do fóton. Em seu início, encontramos:

*“Em 1924 o físico francês Louis de Broglie propôs a seguinte linha de raciocínio: um feixe luminoso é uma onda, mas transfere energia e momento à matéria através de ‘pacotes’ chamados fótons. Por que um feixe de partículas não pode ter as mesmas propriedades? Em outras palavras, porque não podemos pensar um elétron, ou qualquer outra partícula, como uma **onda de matéria**?” (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.196, grifo dos autores).*

A ideia aqui apresentada é uma analogia entre o comportamento da luz e da matéria, ou seja, se a luz, que era tomada como uma onda eletromagnética, tem características corpusculares, pode-se pensar também na possibilidade de que partículas materiais apresentem comportamento ondulatório. De Broglie sugeriu que o comprimento de onda de uma partícula com momento  $p$  seria dado por  $\lambda = h/p$ , aplicando a

<sup>19</sup> O spin é tratado em mais de um momento no livro. Na última vez em que é apresentado é feito algo diferente. Ao invés de simplesmente aparecer como uma propriedade do elétron (e de outras partículas), é dito que ele inicialmente foi postulado de maneira empírica para explicar alguns espectros atômicos (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.248, seção 40.3).

elétrons a equação utilizada até então para o momento de um fóton. Na sequência, o livro cita experimentos em que essa previsão teria sido confirmada, inclusive um em que uma figura de interferência é formada por um feixe de elétrons em um experimento de dupla fenda. As ondas de matéria, como as ondas luminosas, seriam ondas de probabilidade.

Assim como aconteceu quando surgiu a necessidade de se tratar a luz como formada por fótons, surge aqui um problema ao se tratar a matéria como possuindo comportamento ondulatório, já que, até então no livro, ela não foi considerada dessa forma. Assim como aconteceu com a luz, o livro busca harmonizar a consideração da matéria como tendo comportamento ondulatório com a noção até então usada de ela ser composta por partículas. Descreveremos a seguir elementos dessa tentativa de harmonização, mesmo considerando que essa parte não trata de justificativas de existência e nem a caracterizações do elétron, mas ao uso dele em uma explicação.

O livro coloca, na subseção 38.6.1, que, mesmo que os experimentos citados acima (obtenção de figura de interferência por um feixe de elétrons) mostrem que a matéria se comporta como uma onda, existem outros que mostram que ela é composta por partículas, como por exemplo os rastros observados em um experimento utilizando uma câmara de bolhas. Mas o texto levanta a questão da possibilidade de se interpretar esses rastros em termos de ondas. Para tanto, considera cada bolha como um ponto de detecção do elétron e que as ondas de matéria, que se propagam entre dois pontos de detecção, cobririam todas as trajetórias possíveis entre esses dois pontos.

*“Para cada trajetória ligando [dois pontos de detecção], exceto a trajetória em linha reta, existe uma trajetória vizinha em uma posição tal que as ondas de matéria que se propagam ao longo das duas trajetórias se cancelam por interferência. O mesmo não acontece, porém, com a trajetória em linha reta que liga [os dois pontos]; nesse caso as ondas de matéria que se propagam ao longo de todas as trajetórias vizinhas reforçam a onda que se propaga em linha reta. Podemos pensar nas bolhas que formam o rastro como uma série de pontos de detecção nos quais a onda de matéria sofre interferência construtiva.”* (Halliday, Resnick & Walker, 2009d, p.199).

Vemos aqui uma preocupação em criar explicações que permitam certa coerência entre as duas ontologias para o elétron, assim como foi feito com o fóton. Na sequência, o livro apresenta as ondas de matéria, que seriam ondas de probabilidade (assim como a luz), e trata do conceito de função de onda. Com isso, uma série de outros fenômenos são tratados e explicados no livro, utilizando-se agora uma nova ontologia para o elétron.

O livro apresenta, ainda, mais características do elétron em diversas seções e subseções, entre os capítulos 38 e 44, mas todas também apresentadas da mesma forma que as características que já citamos, ou seja, de forma direta, algumas como derivações do comportamento ondulatório do elétron.

De modo geral, o elétron, diferentemente do fóton e do quark, não é apresentado como uma necessidade para se explicar algo. Suas propriedades são apontadas diretamente, sem muitas justificativas. Isso talvez se dê pelo fato de o elétron ser uma partícula mais conhecida que as demais, o que faz com que possa ser tratado mais facilmente como algo real, como um componente do mundo. E mesmo quando uma nova ontologia é apresentada, com o elétron sendo tratado como uma onda, o padrão permanece o mesmo, com a apresentação das suas “novas” propriedades sendo feitas do mesmo modo.

## DISCUSSÕES E INTERPRETAÇÕES DOS RESULTADOS

Os casos aqui relatados mostram que o livro considera as três entidades analisadas como sendo componentes do mundo físico. Como já citamos anteriormente, o prefácio já assumia uma posição realista. Os caminhos que levaram à atribuição de realidade às partículas foram considerados como um processo de descoberta.

A justificativa para a existência das entidades, quando presente, deu-se por meio de *inferências abduativas*, ou seja, o poder explicativo que se obtém ao tomar determinada entidade como real forneceria as bases para crermos nessa realidade. Foi o caso da existência do fóton e do quark, que aparece como inferência necessária para a explicação de certos resultados experimentais. No entanto, é importante destacar que isso não foi mencionado explicitamente no livro, ou seja, em nenhum momento existiu uma discussão própria a respeito dessa forma de caracterização de realidade.



A ausência de uma discussão explícita a respeito da realidade das partículas, como nos casos do fóton e do quark, ou mesmo no caso do elétron em que simplesmente não é apresentada nenhuma explicação para se considerar sua existência – tratada como algo evidente –, indica que a discussão de critérios para atribuição de realidade não era uma preocupação do livro. As justificativas de realidade não apareceram de forma clara e, mais ainda, eram pouco frequentes. No entanto, considerando a aprendizagem de aspectos da natureza da ciência, cabe mencionar que diversos trabalhos afirmam que abordagens implícitas são insuficientes, conforme é apontado em McComas (2008) e em Martins (2015).

No caso do fóton, existiu inclusive a menção a uma explicação alternativa para o efeito fotoelétrico, que não utilizava fótons, menção essa que enfraquecia a inferência usada para atribuir realidade a ele, e, ainda assim, afirmava-se que essa partícula “realmente” existia. Ou seja, não era problema para o livro enfraquecer o argumento que justificava a existência da entidade, o que também mostra que essa justificativa não era uma preocupação.

Dessa forma, de modo geral, podemos dizer que não há no livro uma busca por explicitar os critérios utilizados para atribuição de realidade às entidades. O foco não está na realização de discussões a respeito de justificativas de existência e, mais ainda, parece não haver preocupação com a ausência desse tipo de discussão.

Nesse sentido, a obra adota uma estratégia comum a vários livros didáticos de ciências de não apresentar no rol dos seus assuntos elementos do processo de construção do conhecimento científico e da natureza desses conhecimentos. Isso foi apontado por McComas, Clough e Almazroa ao afirmarem que “em todos os níveis, o ensino de ciências e os livros didáticos enfatizam a memorização do conteúdo da ciência para a quase total exclusão do processo de geração de conhecimento” (1998, p.4, tradução nossa). A opção dos autores do livro em análise é focalizar o esforço didático quase que exclusivamente nos conteúdos e na proposição de resolução de problemas. A maioria das menções às entidades as tratava como já existentes e bem definidas.

Cabe destacar e explorar um pouco mais o fato de que no livro o leitor toma contato com as entidades frequentemente nas aplicações que elas tomam parte, sobretudo nos inúmeros exercícios que envolvem cálculos. Isso pôde ser visto na quantidade de trechos classificados em cada uma das duas categorias utilizadas nesse estudo. Os trechos que entraram na Categoria 2 (*aplicação e outros*) foram em número muito maior que os classificados na Categoria 1 (*existência/caracterização*). Aliás, podemos inclusive dizer que as eventuais discussões sobre realidade, quando ocorrem, acabam suplantadas, pelo pouco destaque, frente ao número muito maior de vezes em que as entidades são tratadas como já existentes e são utilizadas em outras explicações e em exercícios.

Nesse sentido, consideramos que o tratamento utilitarista dado às entidades nesta obra possui um caráter *rotineiro*. Giddens (2009), propõe o conceito de *rotinização* para tratar do caráter habitual da maior parte das práticas da vida social, onde preponderam formas de conduta familiares, sustentadas por *uma confiança de que as coisas são como aparentam ser*. Esse autor aponta que os atores humanos possuem como aspecto inerente a capacidade de entender aquilo que fazem e que a capacidade de reflexão é uma característica presente na conduta social. No entanto, essa reflexividade operaria somente de forma parcial no nível da *consciência discursiva*<sup>20</sup> (Giddens, 2009), muito do que as pessoas sabem acerca do que fazem e porque fazem está no nível da *consciência prática*<sup>21</sup> e consiste primordialmente em conhecimentos tácitos. Na consciência prática, a reflexividade seria uma espécie de monitoração contínua da ação, própria e dos outros, ou do fluxo contínuo da vida social. Esse monitoramento envolveria uma reflexividade mínima e garantiria a capacidade de prosseguir no âmbito das rotinas dos diferentes contextos que as pessoas tomam parte.

Cabe esclarecer que rotinas não são formas de comportamento executadas sem a intervenção do pensamento, mesmo elas sendo compostas por atividades que muitas vezes são empreendidas de maneira idêntica dia após dia. No entanto, as formas de reflexão estariam limitadas ao fluxo das atividades, sem que isso necessariamente passe pela consciência discursiva. Questionamentos referentes a intenções ou razões de certas condutas não são normalmente formulados pelas pessoas, mas podem ser se elas se depararem com uma “quebra” na previsibilidade da rotina, o que demandaria um nível de reflexão além daquele da consciência prática. Mas conforme esclarece Giddens, esses momentos de “quebra” não são tão frequentes

<sup>20</sup> Aquilo que os atores sociais “são capazes de dizer, ou expressar verbalmente, acerca das condições sociais, incluindo especialmente as condições de sua própria ação” (Giddens, 2009, p.440).

<sup>21</sup> Seria “o que os atores sabem (creem) acerca das condições sociais, incluindo especialmente as de sua própria ação, mas não podem expressar discursivamente” (Giddens, 2009, p.440).

e a continuidade da vida ordinária seria impossível se todos os objetos ou situações fossem submetidos a questionamentos e/ou a análises.

Como já foi dito, entendemos que o livro didático em análise adota um caráter rotineiro em relação ao tratamento das entidades. Há um caráter habitual, justamente na aplicação delas, e das teorias relacionadas, nas situações propostas, principalmente em exercícios algébricos. Nessa atuação rotineira, o que se tem preponderantemente é um tipo de contato com as entidades que não demanda reflexões sobre sua existência, mas uma reflexividade relacionada ao “como fazer”, ao como usar certos conteúdos para resolver problemas, suficiente para o desenvolvimento das rotinas. Isso representa modos de pensar relacionados à *consciência prática*. As entidades simplesmente são tomadas como reais de antemão, de maneira tácita, existindo uma confiança que elas são aquilo que o livro mostra que são.

Conforme apontamos, segundo Giddens, uma forma de trazer uma questão para uma reflexão que vai além da consciência prática seria por meio de uma quebra na previsibilidade da rotina, como por exemplo em uma situação incomum, já que isso demandaria uma reflexão no nível da *consciência discursiva*. No entanto, a análise do livro demonstrou a inexistência de tais oportunidades de “quebra”. Primeiro porque há um mesmo padrão de abordagem para as entidades; segundo porque falta uma explicitação clara, e uma proposta de reflexão, a respeito dos critérios utilizados para definir a existência delas. O foco do livro está em ensinar os estudantes a utilizar determinadas técnicas para resolver problemas, o que, como já dissemos, fica evidenciado já em seu prefácio (Halliday, Resnick & Walker, 2009a).

Essa ausência de reflexão sobre a existência das entidades também é algo que pode ser aproximado das formas pelas quais a realidade cotidiana geralmente é tomada, de uma maneira pragmática, utilitária e sem reflexões sobre os seus fundamentos (Schutz, 1974). Dessa forma, temos que no caso do livro em análise, assim como em relação à realidade cotidiana no geral, a reflexividade relacionada à consciência discursiva parece não estar presente quando se trata da existência dos componentes do mundo.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Partimos da posição de que o ensino/aprendizagem da física envolve não somente tratar de aspectos conceituais e operacionais de suas teorias, mas também reflexões sobre questões relacionadas à natureza dos conhecimentos científicos, inclusive sobre a realidade das entidades da ciência. Nesse sentido, foi realizada essa investigação acerca de como é atribuída realidade a entidades científicas em uma coleção de livros didáticos de física e se as discussões sobre a realidade dessas entidades são significativas frente às demais formas de tratá-las no livro.

Nossa avaliação geral é que o material analisado não aborda de maneira adequada as dimensões ontológica e epistemológica do conhecimento físico ao não explorar o realismo das entidades que se propõe a apresentar.

As justificativas para as entidades serem tomadas como reais se deram por meio de inferências abduativas, mas de maneira pouco explícita e pouco frequente, não aparecendo no livro uma preocupação em promover reflexões sobre critérios de atribuição de realidade às entidades. Além disso, elas são tratadas na maior parte do tempo de forma operacional, com ênfase em cálculos matemáticos que envolvem conceitos sobre essas partículas. Entendemos que a abordagem do Halliday possui uma feição “rotineira”, com foco em atividades de aplicação e resolução de problemas algébricos, atividades essas que não exigem reflexões sobre a realidade das entidades, mas tão somente reflexões concernentes ao “como fazer”, ou seja, à utilização das entidades e das teorias relacionadas na resolução de exercícios.

Atividades rotineiras limitam os modos de pensar aquilo que Giddens chamou de consciência prática. Dessa forma, a compreensão dos alunos acerca da realidade das entidades, ao estudar física nesse livro, pode permanecer em um nível tácito e utilitário, não havendo elementos suficientes para o esclarecimento da problemática acerca de como a ciência caracteriza a realidade do mundo e em que sentido as entidades científicas podem realmente ser consideradas reais.

Por fim, julgamos que o caráter rotineiro e tácito sobre as entidades pode, ainda, deixar espaço para outros esquemas interpretativos (Sewell, 2005) acerca da realidade da ciência, como aqueles vindos da vida cotidiana, que são proeminentes nas pessoas em geral (Schutz, 1974; Marineli & Pietrocola, 2016). Esses esquemas abarcam critérios de existência, bem como formas mais gerais de entendimento, que não são necessariamente conscientes – discursivamente falando –, pois são fruto da naturalização de modos de agir no mundo e de compreendê-lo.



## AGRADECIMENTOS

À CAPES e à FAPEG pelo apoio financeiro ao projeto que deu origem a este trabalho. Aos árbitros pelas críticas e sugestões.

## REFERÊNCIAS

- Bagdonas, A.; Zanetic, J., & Gurgel, I. (2014). Controvérsias sobre a natureza da ciência como enfoque curricular para o ensino da física: o ensino de história da cosmologia por meio de um jogo didático. *Revista Brasileira de História da Ciência*, 7(2), 242-260. Recuperado de [https://www.sbhc.org.br/arquivo/download?ID\\_ARQUIVO=1960](https://www.sbhc.org.br/arquivo/download?ID_ARQUIVO=1960)
- Chevallard, Y. (1991). *La Transposición Didáctica: del saber sabio al saber enseñado*. Trad. Claudia Gilman. Buenos Aires: Aique Grupo Editor.
- Chibeni, S. S. (1996). A inferência abdutiva e o realismo científico. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, série 3, 6(1), 45-73. Recuperado de <http://www.unicamp.br/~chibeni/public/abdrea.pdf>
- Dutra, L.H.A. (1998). *Introdução à Teoria da Ciência*. Florianópolis: Editora da UFSC.
- Eflin, J.T., Glennan, S., & Reisch, G. (1999). The nature of science: A perspective from the philosophy of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 36(1), 107-116. DOI: [10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199901\)36:1%3C107::AID-TEA7%3E3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199901)36:1%3C107::AID-TEA7%3E3.0.CO;2-3)
- Fernández, I., Gil, D., Carrascosa, J., Cachapuz, A., & Praia, J. (2002). Visiones deformadas de la ciencia transmitidas por la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, 20(3), p. 477-488. Recuperado de <https://ddd.uab.cat/pub/edlc/02124521v20n3/02124521v20n3p477.pdf>
- Giddens, A. (2009). *A constituição da sociedade* (3a. ed.). Tradução de Álvaro Cabral. São Paulo: Editora WMF Martins Fontes.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2008). *Fundamentals of physics: extended* (8th ed.). Hoboken: John Wiley & Sons.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2009a). *Fundamentos de Física, vol. 1: mecânica* (8a. ed.). Tradução de Ronaldo Sérgio de Biasi. Rio de Janeiro: LTC, 4v.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2009b). *Fundamentos de Física, vol. 2: gravitação, ondas e termodinâmica* (8a. ed.). Tradução de Ronaldo Sérgio de Biasi. Rio de Janeiro: LTC, 4v.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2009c). *Fundamentos de Física, vol. 3: eletromagnetismo* (8a. ed.). Tradução de Ronaldo Sérgio de Biasi. Rio de Janeiro: LTC, 4v.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2009d). *Fundamentos de Física, vol. 4: óptica e física moderna* (8a. ed.). Tradução de Ronaldo Sérgio de Biasi. Rio de Janeiro: LTC, 4v.
- Kuhn, T. (2005). *A Estrutura das Revoluções Científicas*. (9a. ed.). São Paulo: Perspectiva.
- Lamb, W.E., & Scully, M. O. (1969). The photoelectric effect without photons. In *Polarization, Matière et Rayonnement*. Presses University de France, Paris. Recuperado de <http://users.unimi.it/aqm/wp-content/uploads/Lamb-1968.pdf>
- Lederman, N. G. (1992). Student's and teacher's conceptions of the nature of science: a review of the research. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(4), 331-359. DOI: [10.1002/tea.3660290404](https://doi.org/10.1002/tea.3660290404)
- Lima, N. W., Antunes, E., Ostermann, F., & Cavalcanti, C. J. H. (2017a). Uma Análise Bakhtiniana dos Enunciados sobre o Efeito Fotoelétrico em Livros Didáticos do Ensino Superior. In X Congresso Internacional sobre Investigación en Didácticas de las Ciencias, 2017, Sevilla. *Enseñanza de las ciencias*, Núm. Extra, 1947-1952. Recuperado de [https://ddd.uab.cat/pub/edlc/edlc\\_a2017nEXTRA/23\\_-\\_Uma\\_Analise\\_Bakhtiniana\\_dos\\_Enunciados\\_Sobre.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/edlc/edlc_a2017nEXTRA/23_-_Uma_Analise_Bakhtiniana_dos_Enunciados_Sobre.pdf)

- Lima, N. W., Antunes, E., Ostermann, F., & Cavalcanti, C. J. H. (2017b). A História do Fóton em Livros de Física. In: X Congresso Internacional sobre Investigación en Didácticas de las Ciencias, 2017, Sevilla. *Enseñanza de las ciencias*, Núm. Extra, 1953-1958. Recuperado de [https://ddd.uab.cat/pub/edlc/edlc\\_a2017nEXTRA/24\\_-\\_A\\_Historia\\_do\\_Foton\\_em\\_Livros\\_de\\_Fisica.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/edlc/edlc_a2017nEXTRA/24_-_A_Historia_do_Foton_em_Livros_de_Fisica.pdf)
- Marineli, F. (2016). *A realidade das entidades científicas e a formação de professores de física: uma análise sociocultural*. Tese (Doutorado em Educação). Universidade de São Paulo, São Paulo. Recuperado de <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/48/48134/tde-29042016-132736/pt-br.php>
- Marineli, F., & Pietrocola, M. (2016). Estruturas Culturais, Esquemas e Recursos: como licenciandos em Física concebem e justificam o status ontológico de entidades em diferentes contextos. *Investigações em Ensino de Ciências*, 21(3), 109-126. DOI: [10.22600/1518-8795.ienci2016v21n3p109](https://doi.org/10.22600/1518-8795.ienci2016v21n3p109)
- Martins, A. F. P. (2015). Natureza da Ciência no ensino de ciências: uma proposta baseada em “temas” e “questões”. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 32(3), 703-737. DOI: [10.5007/2175-7941.2015v32n3p703](https://doi.org/10.5007/2175-7941.2015v32n3p703)
- Matthews, M. R. (1994). *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science*. New York: Routledge.
- McComas, W. F. (2008). Seeking historical examples to illustrate key aspects of the nature of science. *Science & Education*, 17(2-3), 249-263.
- McComas, W. F., Clough, M. P., & Almazroa, H. (1998). The role and character of the nature of science in science education. In McComas, W.F. (Ed.). *The nature of science in science education: rationales and strategies*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 3-39.
- Moraes, R. (1999). Análise de conteúdo. *Educação*, Porto Alegre, 22(37), 7-32. Recuperado de [http://cliente.argo.com.br/~mgos/analise\\_de\\_conteudo\\_moraes.html](http://cliente.argo.com.br/~mgos/analise_de_conteudo_moraes.html)
- Moreira, M.A. (2000). Ensino de Física no Brasil: Retrospectiva e Perspectivas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 22(1), 94-99. Recuperado de [http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22\\_94.pdf](http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_94.pdf)
- Moura, B. A. (2014). O que é natureza da ciência e qual sua relação com a história e filosofia da ciência? *Revista Brasileira de História da Ciência*, 7(1), 32-46. Recuperado de [http://www.sbhci.org.br/arquivo/download?ID\\_ARQUIVO=1932](http://www.sbhci.org.br/arquivo/download?ID_ARQUIVO=1932)
- Schutz, A. (1974). Sobre las realidades múltiples. In \_\_\_\_\_. *El Problema de la Realidad Social*. Tradução de Néstor Míguez. Buenos Aires: Amorrortu, pp. 197-238.
- Sewell, W. H. Jr. (2005). *Logics of history: social theory and social transformation*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Silva, M.R. (1998). Realismo e anti-realismo na ciência: aspectos introdutórios de uma discussão sobre a natureza das teorias. *Ciência & Educação*, 5(1), 7-13. DOI: [10.1590/S1516-73131998000100002](https://doi.org/10.1590/S1516-73131998000100002)
- Tiercelin, C. (1999). Verbetes “Realisme”. In Lecourt, D. (org). *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*. Paris: Puf.
- Vieira, J. G. S., & Fernández, R.G. (2006). A estrutura das revoluções científicas na economia e a Revolução Keynesiana. *Estudos Econômicos*, São Paulo, 36(2), 355-381. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/ee/v36n2/v36n2a07.pdf>
- Zwiebel, C. (2012). The Undergraduate introductory physics textbook and the future. *2012 AHS Capstone Projects*. Paper 22. Recuperado de [http://digitalcommons.olin.edu/ahs\\_capstone\\_2012/22](http://digitalcommons.olin.edu/ahs_capstone_2012/22)



Recebido em: 15.05.2018

Aceito em: 08.11.2018

**Apêndice:**

**Indicação dos trechos em que cada uma das três entidades analisadas é mencionada no livro, categorizados**

**Quadro 5 – Trechos que mencionam as palavras fóton ou fótons, categorizados**

Entidade	Parte do texto	Categoria 1	Categoria 2
Fóton	Seções/subseções (corpo do texto)	38.2, 38.3.0, 38.3.1, 38.3.2, 38.4.0, 38.5.2, 38.5.3	38.1, 38.3.3, 38.5.0, 38.5.1, 38.6.0, 39.3.3, 39.6.1, 39.7.1, 39.9.1, 40.2.2, 40.6, 40.10.1, 40.10.2, 40.10.4, 40.12.0, 40.12.1, 41.10.0, 41.10.2, 42.3.6, 42.6.0, 43.3, 43.7, 44.2.1, 44.2.3, 44.3, 44.9.1, 44.9.2, 44.9.3, 44.14.0
	Exemplos	38.2	38.1, 38.3, 38.4, 39.1, 39.4, 39.6, 40.2, 40.4
	Testes	-	-
	Táticas	-	-
	Revisão e resumo	38 - Tópico “Fótons”	38 - Tópico “Efeito fotoelétrico” 38 - Tópico “Ondas luminosas e fótons” 39 - Tópico “Um elétron em um poço de potencial infinito” 40 - Tópico “Algumas propriedades dos átomos” 40 - Tópico “Os espectros de raio X dos elementos” 40 - Tópico “O laser e a luz do laser” 44 - Tópico “As interações”
	Perguntas	-	38.5, 38.10, 39.14
	Problemas	-	38.1, 38.2, 38.3, 38.4, 38.5, 38.6, 38.8, 38.9, 39.10, 38.11, 38.12, 38.13, 38.14, 38.15, 38.24, 38.27, 38.28, 38.30, 38.31, 38.32, 38.33, 38.34, 38.35, 38.37, 38.38, 38.39, 38.40, 38.41, 38.42, 38.45, 38.46, 38.52, 38.53, 38.64, 38.75, 38.82, 38.83, 38.84, 39.10, 39.12, 39.20, 39.35, 39.36, 39.38, 39.40, 39.46, 39.48, 40.17, 40.18, 40.34, 40.35, 40.39, 40.44, 40.46, 40.47, 40.51, 40.55, 40.57, 40.68, 41.39, 42.31, 42.34, 42.73, 43.38, 44.39, 44.44

**Quadro 6 – Trechos que mencionam as palavras quark ou quarks, categorizados**

Entidade	Parte do texto	Categoria 1	Categoria 2
Quark	Seções/subseções (corpo do texto)	21.5, 44.7, 44.8.0, 44.8.4, 44.9.3	28.7.0, 42.3.8, 44.8.1, 44.8.2, 44.8.3, 44.14.0
	Exemplos	-	44.5
	Testes	-	-
	Táticas	-	-

	Revisão e resumo	44 - Tópico “Quarks”	42 - Tópico “A força nuclear” 44 - Tópico “Léptons e quarks” 44 - Tópico “As interações” 44 - Tópico “Hádrons: bárions e mésons”
	Perguntas	-	44.6, 44.9, 44.11
	Problemas	-	21.45, 24.99, 44.23, 44.24, 44.25, 44.26, 44.27, 44.29, 44.47

**Quadro 7** – Trechos que mencionam as palavras elétron ou elétrons, categorizados

Entidade	Parte do texto	Categoria 1	Categoria 2
Elétron	Seções/subseções (corpo do texto)	1.7.1, 21.3.0, 21.5, 28.2, 28.4, 28.10, 32.7.1, 32.7.2, 37.12.2, 38.6.0, 38.9.0, 39.3.2, 39.3.3, 39.4.0, 39.4.1, 39.5, 39.7.1, 39.7.2, 40.3, 40.4.0, 40.4.1, 40.4.2, 44.3, 44.4.0	2.2, 5.2, 16.2, 16.9, 18.2.1, 21.3.1, 21.3.2, 21.4.0, 21.4.1, 21.6, 22.8.2, 22.8.3, 22.8.4, 22.9.0, 23.6.0, 24.3.0, 24.8.1, 24.12.1, 24.12.2, 25.2.1, 25.5.0, 26.2.0, 26.2.1, 26.3.1, 26.6, 26.8, 26.9, 28.3.1, 28.5, 28.6.0, 28.6.1, 28.7.0, 28.8, 30.2, 30.3.0, 30.5.2, 30.6.0, 31.6, 31.11.4, 32.2.1, 32.6.0, 32.7.0, 32.7.3, 32.7.4, 32.8, 32.9, 32.10, 32.11.0, 36.10.1, 37.2.1, 37.12.3, 38.3.0, 38.3.1, 38.3.2, 38.3.3, 38.4.0, 38.4.1, 38.6.1, 38.9.1, 39.1, 39.2, 39.3.1, 39.4.2, 39.4.3, 39.6.0, 39.6.1, 39.6.2, 39.6.3, 39.8.0, 39.8.1, 39.8.2, 39.8.3, 39.9.1, 39.9.2, 39.9.3, 39.9.4, 40.2.1, 40.2.3, 40.4.3, 40.5.3, 40.7, 40.8.0, 40.8.1, 40.9.0, 40.9.1, 40.9.2, 40.9.3, 40.9.4, 40.10.0, 40.10.1, 40.10.2, 40.10.3, 40.10.4, 40.12.1, 41.3, 41.4, 41.5.0, 41.5.1, 41.5.2, 41.5.3, 41.5.4, 41.5.5, 41.5.6, 41.6.0, 41.6.1, 41.6.2, 41.6.3, 41.7.1, 41.7.2, 41.8.0, 41.8.1, 41.8.2, 41.9, 41.10.0, 41.10.2, 41.11.0, 42.1, 42.2, 42.3.2, 42.3.3, 42.3.4, 42.3.6, 42.3.7, 42.3.8, 42.6.0, 42.6.1, 42.6.2, 42.8, 42.9.2, 43.1, 43.2.1, 43.7, 43.8.0, 44.2.0, 44.2.1, 44.2.2, 44.2.3, 44.1.1, 44.9.1, 44.10, 44.13, 44.14.0
	Exemplos	-	21.3, 22.2, 22.5, 23.5, 23.6, 24.1, 24.4, 24.7, 25.1, 25.3, 26.1, 26.3, 26.6, 27.5, 28.2, 28.4, 37.6, 37.7, 37.8, 38.2, 38.3, 38.4, 38.5, 38.6, 38.7, 39.1, 39.2, 39.3, 39.4, 39.5, 39.8, 40.3, 40.4, 40.5, 41.1, 41.2, 41.3, 41.6, 42.3, 42.6, 42.7, 44.4
	Testes	-	21.2, 21.3, 22.1, 22.3, 24.3, 24.6, 26.2, 28.3, 32.4, 38.3, 39.2, 39.3, 40.1, 40.2, 41.2
	Táticas	-	21.1, 25.3
	Revisão e resumo	32 - Tópico “Momento dipolar magnético de spin” 32 - Tópico “Momento dipolar magnético orbital” 38 - Tópico “Ondas de matéria” 39 - Tópico “Um elétron em um poço de potencial infinito” 39 - Tópico “Um elétron em um poço de potencial finito” 39 - Tópico	21 - Tópico “Carga elétrica” 26 - Tópico “Resistividade de um metal” 26 - Tópico “Semicondutores” 32 - Tópico “Ferromagnetismo” 38 - Tópico “Efeito fotoelétrico” 38 - Tópico “Deslocamento de Compton” 39 - Tópico “Normalização e energia de ponto zero” 39 - Tópico “O átomo de hidrogênio” 40 - Tópico “Princípio de exclusão de Pauli” 40 - Tópico “Construção da tabela periódica” 40 - Tópico “Os espectros de raios X dos elementos” 41 - Tópico “Níveis de energia em um sólido cristalino”



		“Armadilhas eletrônicas bidimensionais e tridimensionais” 40 - Tópico “Momento angular e momento magnético” 44 - Tópico “Léptons”	41 - Tópico “Isolantes” 41 - Tópico “Metais” 41 - Tópico “Semicondutores” 41 - Tópico “A junção p-n” 42 - Tópico “Decaimento Beta”
--	--	---	--

Entidade	Parte do texto	Categoria 1	Categoria 2
Elétron	Perguntas	-	21.1, 22.6, 23.9, 26.5, 26.6, 26.7, 28.9, 28.10, 29.4, 32.2, 32.6, 32.9, 38.1, 38.3, 38.4, 38.6, 38.9, 38.10, 38.12, 38.13, 38.14, 38.16, 39.1, 39.2, 39.3, 39.4, 39.5, 39.6, 39.7, 39.8, 39.10, 39.11, 39.12, 39.13, 39.14, 40.1, 40.2, 40.3, 40.4, 40.5, 40.6, 40.8, 40.9, 40.10, 41.6, 41.7, 41.8, 41.11, 42.5, 43.7, 44.3, 44.5, 44.8
	Problemas	-	2.16, 2.23, 2.27, 4.3, 4.6, 4.93, 4.113, 4.124, 5.29, 5.104, 9.100, 9.111, 9.127, 19.22, 21.25, 21.26, 21.27, 21.28, 21.34, 21.35, 21.36, 21.41, 21.49, 21.52, 21.57, 21.65, 21.68, 22.14, 22.15, 22.39, 22.40, 22.41, 22.44, 22.46, 22.48, 22.49, 22.50, 22.51, 22.52, 22.54, 22.68, 22.70, 22.71, 22.74, 22.76, 22.78, 22.86, 23.17, 23.24, 23.39, 23.40, 23.73, 23.76, 24.1, 24.2, 24.4, 24.6, 24.37, 24.44, 24.49, 24.50, 24.53, 24.55, 24.56, 24.57, 24.58, 24.60, 24.61, 24.69, 24.71, 24.78, 24.81, 24.87, 24.103, 24.112, 25.3, 25.22, 25.25, 25.33, 26.1, 26.4, 26.9, 26.31, 26.36, 26.37, 26.40, 26.47, 26.66, 26.70, 26.74, 27.10, 28.1, 28.5, 28.7, 28.8, 28.9, 28.12, 28.17, 28.18, 28.19, 28.21, 28.22, 28.27, 28.28, 28.30, 28.32, 28.33, 28.34, 28.52, 28.68, 28.70, 28.72, 28.73, 28.74, 28.81, 28.82, 29.54, 29.55, 29.76, 30.79, 32.32, 32.33, 32.34, 32.35, 32.38, 32.43, 32.45, 32.61, 32.63, 32.64, 32.74, 33.21, 35.110, 37.10, 37.41, 37.43, 37.44, 37.46, 37.52, 37.54, 37.55, 37.56, 37.58, 37.71, 37.73, 37.81, 37.83, 38.6, 38.15, 38.17, 38.18, 38.19, 38.20, 38.21, 38.22, 38.23, 38.24, 38.25, 38.28, 38.29, 38.30, 38.31, 38.32, 38.33, 38.34, 38.35, 38.36, 38.37, 38.38, 38.39, 38.41, 38.42, 38.43, 38.45, 38.46, 38.49, 38.50, 38.51, 38.52, 38.53, 38.54, 38.63, 38.64, 38.66, 38.67, 38.68, 38.74, 38.76, 38.78, 38.83, 38.84, 39.1, 39.2, 39.3, 39.5, 39.6, 39.7, 39.8, 39.9, 39.10, 39.11, 39.12, 39.13, 39.15, 39.16, 39.17, 39.18, 39.20, 39.21, 39.22, 39.23, 39.24, 39.25, 39.26, 39.27, 39.28, 39.29, 39.30, 39.34, 39.39, 39.41, 39.45, 39.48, 39.50, 39.51, 39.56, 39.58, 39.60, 39.61, 40.1, 40.4, 40.6, 40.7, 40.8, 40.10, 40.11, 40.12, 40.13, 40.16, 40.17, 40.18, 40.20, 40.21, 40.22, 40.23, 40.24, 40.25, 40.26, 40.27, 40.28, 40.29, 40.30, 40.31, 40.33, 40.34, 40.35, 40.37, 40.38, 40.39, 40.43, 40.45, 40.63, 40.67, 40.68, 40.69, 40.73, 40.74, 40.75, 40.77, 41.2, 41.5, 41.9, 41.10, 41.14, 41.17, 41.18, 41.19, 41.20, 41.21, 41.22, 41.23, 41.25, 41.26, 41.27, 41.28, 41.29, 41.30, 41.31, 41.32, 41.33, 41.34, 41.36, 41.39, 41.41, 41.46,

			41.47, 41.51, 42.13, 42.14, 42.53, 42.54, 42.56, 42.57, 42.59, 42.75, 42.76, 42.87, 42.95, 42.96, 42.97, 43.20, 44.1, 44.3, 44.14, 44.36, 44.43
--	--	--	---