

# O CONCEITO DE ENERGIA NA TEORIA QUÂNTICA\*

## The Concept of Energy in Quantum Theory

Aline Cesar Druzian<sup>1</sup>  
Renato P. dos Santos<sup>2</sup>

**RESUMO:** Os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio, dado o atual desenvolvimento tecnológico, enfatizam a necessidade dos estudantes aprenderem a Teoria Quântica para o entendimento da realidade que cerca. Todavia, a insuficiente formação dos professores e os currículos fechados, datados do século passado, levam a abordagens defasadas dos conceitos quânticos nos currículos de Física no ensino médio. Este artigo tem o intuito de descrever a evolução do conceito de Energia na Teoria Quântica, numa visão histórico-epistemológica que promove a mudança ontológica tão necessária para que os alunos compreendam corretamente os conceitos físicos, favorecendo a interdisciplinaridade e o aprendizado articulado e contextualizado.

**Palavras-chave:** Física Quântica. Energia. História da Física. Evolução Conceitual.

**ABSTRACT:** The National Curriculum Parameters for the high school teaching, given the current technological development, emphasize the need for students to learn Quantum Theory to understand the reality around them. However, the inadequate training of teachers and closed curricula, dating from the last century, lead to outdated approaches to quantum physics concepts in the high school curricula. This article intends to describe the evolution of the Energy concept in Quantum Theory, through a historical-epistemological vision that promotes ontological change much needed for students to correctly understand the physical concepts, encouraging interdisciplinary and articulated and contextualized learning.

**Keywords:** Quantum Physics. Energy. History of Physics. Conceptual Evolution.

## INTRODUÇÃO

Nos primeiros anos do século XX, juntamente com a Teoria da Relatividade de Einstein, emerge a Teoria Quântica que, ambas, revolucionam a ciência moderna. Esta revolução decorre do fato de que em inúmeros fenômenos a Física Clássica deixa a desejar por não possuir, na maioria das vezes, explicações nem mesmo incipientes. O

---

\* Este material faz parte da dissertação que está sendo desenvolvida pelos autores, onde se propõe a construção de um Perfil Conceitual do conceito de Energia através da descrição da evolução ontológica, epistemológica e histórica do conceito, bem como as suas implicações pedagógicas.

<sup>1</sup> Licenciada em Física, Mestranda do Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática, Universidade Luterana do Brasil, (PPGECIM/ULBRA). Canoas, RS. <alinedruzian@terra.com.br>

<sup>2</sup> Doutor em Física, Professor Adjunto do PPGECIM/ULBRA. Canoas, RS. <renato@fisica-interessante.com>

desenvolvimento tecnológico atual, grande parte embasado no desenvolvimento teórico no campo da Mecânica Quântica, evidencia o sucesso da Teoria Quântica. (GRECA, 2000)

“Tudo isto por consequência de a Mecânica Quântica implicar em uma nova forma de perceber os fenômenos, onde idéias e conceitos fortemente arraigados na nossa cultura - como determinismo, localidade, ou tão simplesmente trajetória - tiveram seu âmbito de validade reduzido. Portanto, se é preciso que os cidadãos entendam o fazer científico, por ser a ciência parte integral da cultura (Kragh, 1992) e por ser em grande medida a bússola que norteia o desenvolvimento da humanidade, não se pode aprovar que os mesmos concluam o ensino formal sem ter recebido qualquer noção de Mecânica Quântica, tanto pela importância desta como por ser parte da herança cultural de nosso tempo (Independentemente de outras teorias que possam vir a surgir no seu lugar).” (GRECA, 2000, p. 13)

O aprendizado da Teoria Quântica por estudantes de nível básico se faz necessário para o entendimento da realidade que os cerca, destacando a sua crescente utilização no desenvolvimento tecnológico em diversas áreas do conhecimento, onde a Física Clássica não consegue compreendê-los e explicá-los. Esta importância é destacada nos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio:

“Compreender formas pelas quais a Física e a tecnologia influenciam nossa interpretação do mundo atual, condicionando formas de pensar e interagir. Por exemplo, como a relatividade ou as idéias quânticas povoam o imaginário e a cultura contemporânea, conduzindo à extrapolação de seus conceitos para diversas áreas, como para a Economia ou Biologia.” (PCN, 2000)

Todavia, as formas de abordagem e inserção dos conceitos quânticos nos currículos de Física no ensino médio demonstram grande defasagem denotada por diversas problemáticas. Destas, ressalta-se a formação do professor e os currículos fechados, datados do século passado. (MEDEIROS et al, 2005; GRECA, MOREIRA & HERSCOVITZ, 2001; GRECA, 2000; PINTO & ZANETIC, 1999; TERRAZZAN, 1992)

Esta compreensão por parte dos estudantes dos conceitos quânticos pode ser realizada através de um enfoque histórico-epistemológico, auxiliando no entendimento científico dos conceitos, retirando-lhes sua mística de complexos e de difícil compreensão, na maioria das vezes considerados desconexos da realidade que os cerca ou até mesmo tendo um enfoque esotérico, fortemente divulgado pelas mídias (GRECA, 2000). Com este tipo de enfoque faz com que o estudante percebe que a Física “não é uma mera seqüência linear de eventos, mas antes de tudo é caracterizada por embates entre idéias e interpretações” (MEDEIROS et al, 2005, p.2).

Ademais, este tipo de abordagem promove a mudança ontológica, a qual se faz necessária para que os alunos compreendam corretamente os conceitos físicos, pois as dificuldades encontradas no aprendizado têm sido relacionadas com a falta de uma evolução

ontológica relativa aos conceitos físicos. (MORTIMER, 1996; GALILI & BAR, 1992; CHI, 1991).

Para se efetivar uma mudança ontológica deve se conhecer como o conceito evolui historicamente. Para tanto, será feita uma pequena descrição da evolução do conceito de Energia juntamente com o conceito de Tempo, conceito conjugado ao de Energia na Teoria Quântica, como se verá mais adiante.

Por estes motivos, este trabalho fará a descrição da construção do conceito de Energia na Teoria Quântica, verificando a necessidade de uma “excursão” pelas idéias dos conceitos nos diversos temas da área.

## **1 A EVOLUÇÃO DE ‘ENERGIA’ NA TEORIA QUÂNTICA**

### **1.1 PRÉ-QUÂNTICA**

O conceito de Energia, embora conhecido de forma ambígua desde a Antiguidade, passa a ser definido, sobrepondo-se às concepções subjacentes, durante o século XIX, mais precisamente entre os anos de 1842 e 1847, com os trabalhos de James Prescott Joule, Robert von Mayer, Ludwig August Colding e Hermann von Helmholtz. A energia está ainda sujeita a um Princípio de Conservação que foi sendo estruturado e enunciado durante as investigações destes físicos (BUCUSSI, 2006; KUHN, 1977). Thomas Kuhn (1977, p.112), reforça a estruturação do Princípio da Conservação de Energia, dizendo que:

“... a conservação da energia não é nada menos do que a contrapartida teórica dos processos de conversão laboratoriais, descobertos durante as primeiras quatro décadas do século XIX”. (KUHN, 1977, p. 112)

Contudo, no final do século XIX e início do século XX, a Mecânica Quântica é formalizada como uma teoria científica a partir de três resultados experimentais, o espectro de radiação emitida pelo Corpo Negro, o Efeito Fotoelétrico e o Efeito Compton. Estes resultados trouxeram grandes avanços por explicar fenômenos que a Física Clássica até então não conseguia formalizar (PAULO, 2006).

Nesta época surgia um problema, por causa do crescimento das indústrias siderúrgicas, a fabricação de ligas metálicas de alta qualidade tem necessidade de alta temperatura de fundição e esta deve possuir precisão no valor medido. Entretanto, a perfeição

não era alcançada por não existir instrumento que pudesse medir tais temperaturas, por este motivo, o estudo do espectro da radiação emitida pelos corpos se fez tão importante. Neste período já se sabia a dependência da temperatura com relação ao comprimento de onda emitida (a cor do material metálico varia com o aumento da temperatura) através da Lei de Wien, proposta pelo físico alemão Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien, ganhador do Prêmio Nobel da Física em 1911 por tal feito. Esta lei é expressa pela seguinte equação:

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{b}{T},$$

onde o  $\lambda_{\text{máx}}$  é o comprimento de onda máximo; T é a temperatura do corpo negro; e

b é a constante de proporcionalidade, chamada constante de dispersão de Wien com valor de  $2,8977685 \times 10^{-3}$  K.m (Kelvin-metro).

Entretanto, as previsões da Física Clássica, para este fenômeno, contrariavam o princípio da Conservação de Energia e não servia de solução. A resolução deste problema surgiu com Max Planck, em 1900, que teorizou, a partir de formulação matemática, que a radiação não era emitida em um fluxo contínuo, mas sim com pacotes ou *quanta* de Energia, onde o número de *quanta* é a quantidade total de Energia, aumentando com o decréscimo do comprimento de onda.

No final do século XIX, com as pesquisas de Hertz, já era conhecido que quando dois eletrodos são iluminados por uma luz ultravioleta à intensidade da descarga elétrica entre eles aumentava. Este fenômeno, denominado de Efeito Fotoelétrico, descreve que esta descarga elétrica são os elétrons sendo emitidos (arrancados) da superfície do metal dos eletrodos por causa da radiação luminosa, sabendo-se que quanto mais intensa fosse a radiação, mais elétrons são emitidos. Einstein, em 1905, publica um trabalho que, posteriormente, ganha o Prêmio Nobel, propondo que em certos momentos a luz poderia ser entendida como pacotes de luz ou quantas de luz, onde os denomina de fótons. Além disto, descreve que para ocorrer à emissão de um elétron a radiação luminosa deve possuir uma energia mínima, determinada pela sua frequência, não havendo emissão de elétrons se a frequência da radiação emitida no metal for menor que a frequência mínima necessária. O valor desta frequência para que ocorra a emissão do elétron varia com tipo de material. A descrição quantitativa do Efeito Fotoelétrico é a seguinte equação:  $hf = \phi + E_{C_{\text{max}}}$ , onde  $hf$  é a Energia do fóton,  $\phi$  é a energia necessária para a emissão de um elétron e  $E_{C_{\text{max}}}$  é a Energia Cinética (máxima) com que o elétron é emitido. Pela equação observa-se que a Energia do fóton ( $hf$ ) deve ser maior que a Energia necessária para a emissão de um elétron ( $\phi$ ) para que isto se efetive. A Física Clássica não conseguia explicar esta dependência da frequência e

usava como explicação a ocorrência de acúmulo de energia na superfície do metal. Quando esta Energia atingisse o valor necessário ocorreria a emissão do elétron, pois o que interessava era a intensidade da radiação luminosa emitida na placa de metal, devendo esta ser alta, não importando que a frequência fosse baixa.

O Efeito Compton (ou Espalhamento de Compton) foi observado experimentalmente por Arthur Holly Compton em 1923, que ganhou o Prêmio Nobel por esta observação em 1927. Ele descreve a colisão de fótons de raio X com elétrons: o fóton “perde” Energia para o elétron, diminuindo a sua frequência e aumentando seu comprimento de onda, e o fóton que possui uma Energia restante é emitido em uma direção diferente da inicial, ocorrendo sempre a Conservação da Energia e do Momentum total do sistema. Se a Energia restante do fóton emitido for suficiente, ele pode repetir o processo. A quantificação desta observação provém da junção da Conservação da Energia e da Conservação do Momentum do fóton e do elétron antes e após a colisão, tendo como resultado:  $\lambda_2 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) + \lambda_1$ , onde  $\lambda_1$  é o comprimento de onda do fóton antes da colisão,  $\lambda_2$  é o comprimento de onda do fóton após a colisão,  $m_e$  é a massa do elétron,  $\frac{h}{m_e c}$  é o comprimento de onda de Compton ( $2,43 \times 10^{-12} \text{m}$ ),  $\theta$  é o ângulo da mudança de direção fóton,  $h$  é a constante de Planck, e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo. Para a Física Clássica, a luz é descrita apenas como um fenômeno ondulatório e este experimento de Compton se refere ao comportamento dual, onde a Energia é diretamente proporcional à frequência.

Outra contribuição importante foi a de Niels Bohr, nas primeiras décadas do século XX, ao demonstrar as falhas do modelo atômico de Rutherford, vigente na época em que iniciou os seus estudos. As principais hipóteses levantadas por ele foram:

“1. Que a energia radiada não é emitida (ou absorvida) da maneira contínua admitida pela eletrodinâmica clássica, mas apenas durante a passagem dos sistemas de um estado "estacionário" para outro diferente.

2. Que o equilíbrio dinâmico dos sistemas nos estados estacionários é governado pelas leis da mecânica clássica, não se verificando estas leis nas transições dos sistemas entre diferentes estados estacionários.

3. Que é homogênea a radiação emitida durante a transição de um sistema de um estado estacionário para outro, e que a relação entre a frequência  $f$  e a quantidade total de energia emitida é dada por  $E = hf$ , sendo  $h$  a constante de Planck.

4. Que os diferentes estados estacionários de um sistema simples constituído por um elétron que gira em volta de um núcleo positivo são determinados pela condição de ser igual a um múltiplo inteiro de  $h/2$  a razão entre a energia total emitida durante a formação da configuração e a frequência de revolução do elétron. Admitindo que a órbita do elétron seja circular, esta hipótese

equivale a supor que o momento angular do elétron em torno do núcleo é igual a um múltiplo inteiro de  $h/2\pi$ .

5. Que o estado "permanente" de um sistema atômico - isto é, o estado no qual a energia emitida é máxima - é determinado pela condição de ser igual a  $h/2\pi$  o momento angular de cada elétron em torno do centro da sua órbita." (DOS SANTOS, 2002)

Além disto, ressalta que o comprimento de onda da radiação emitida depende do número de órbitas sobre as quais saltam os elétrons e da proximidade destas órbitas em relação ao núcleo, podendo este comprimento de onda compreender todo o espectro da radiação eletromagnética. Como as órbitas se mantêm em posições fixas, podem-se observar, através do espectroscópio, linhas espectrais específicas, produzidas pela emissão da radiação, sendo estas linhas características de cada átomo ou molécula, produzindo, assim, uma "impressão digital" dos mesmos. Estas linhas espectrais descritas por Bohr se enquadram em uma série matemática simples. A primeira série de linhas espectrais para o átomo de Hidrogênio foi observada, em 1895, pelo físico suíço Johann Balmer. Posteriormente, em 1906, o físico norte-americano Theodore Lyman observou a segunda série de linhas espectrais, enquanto era professor em Harvard e, ao sair de lá, foi diretor do Jefferson Physical Laboratory, onde continuou os seus estudos na área de espectroscopia. Dois anos após, em 1908, o físico alemão Louis Paschen observou a terceira série de linhas espectrais para o átomo de Hidrogênio. Cabe ressaltar que, para cada série de linhas espectrais corresponde uma quantidade quantizada de Energia, onde ocorrem os saltos dos elétrons. Entretanto, o que acarretou maior significância ao estudo de Bohr é que correspondia aos trabalhos de Planck e Einstein.

## 1.2 QUÂNTICA

Na segunda década do século XX, surgem duas teorias, uma descrita pelo físico austríaco Erwin Schrödinger e outra pelo físico alemão Werner Heisenberg, que vem estruturar e formalizar a Teoria Quântica, descrevendo os fenômenos nos quais a Física Newtoniana (Clássica) não alcança. As duas propostas são muito semelhantes, entretanto o formalismo matemático utilizado por eles foi diferenciado. Heisenberg utiliza a Álgebra Matricial, mais tarde denominada de Mecânica Matricial, para a descrição da função de onda, onde esta é expressa como matriz linha ou matriz coluna e as grandezas físicas como matrizes quadradas. Entretanto a sua descrição da função de onda não se mostrou tão eficiente, por causa das dificuldades matemáticas apresentadas, quanto à equação proposta por Schrödinger,

que demonstra uma maior acessibilidade matemática por utilizar uma equação diferencial de segunda ordem para a descrição da função de onda. Além da formalização da função de onda, Heisenberg formula um enunciado para a Teoria Quântica denominado Princípio da Incerteza. Tais formalizações serão descritas a seguir.

### 1.2.1 A EQUAÇÃO DE SCHRÖDINGER

Em 1926, Schrödinger publica quatro trabalhos no *Annalen der Physik Leipzig*, onde desenvolve a Teoria Quântica e a sua famosa equação, que descreve a evolução temporal dos sistemas físicos sujeitos a esta Teoria. O desenvolvimento da equação pode ser formulado da seguinte maneira (PAULO, 2006):

A partir de uma onda plana, que pode ser descrita por uma exponencial imaginária ( $Ae^{\pm i(kx-\omega t)}$ ) e utilizando as equações de energia ( $E = \hbar\omega$ ), e momento ( $p = \hbar\kappa$ ), Schrödinger introduziu os operadores diferenciais denominados Operadores de Energia ( $E_{op} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$ ) e momento ( $p_{op} = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$ ), tomando estas equações como válidas para qualquer circunstância. Após esta formalização, escreve-se a Energia Total como a soma da Energia Cinética e Potencial  $\left(E_T = E_C + E_p = \frac{p^2}{2m} + V\right)$  em termos de operadores que operam sobre a função de onda  $\Psi$   $\left(E_{op} \Psi = \frac{p_{op}^2 \Psi}{2m} + V\Psi\right)$ . Sabendo-se disto, e introduzindo as expressões dos operadores obtém-se a equação de Schrödinger  $\left(i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = -\frac{\hbar^2 \partial^2}{2m \partial x^2} \Psi + V\Psi\right)$  para uma dimensão. Esta equação executa o mesmo papel que a segunda Lei de Newton desempenha na Física Clássica, porém esta tem validade somente no mundo macroscópico.

A função de onda ( $\Psi$ ), que é a solução da equação de Schrödinger, pode ser descrita como uma autofunção do Operador Hamiltoniano ( $\hat{H}$ ), da seguinte forma:  $\hat{H}\Psi = E\Psi$ , onde a Energia ( $E$ ) é um autovalor do Operador ( $\hat{H}$ ). Com isto, pode-se dizer que da solução da equação de Schrödinger obtém-se autovalores (Energia) e autofunções do Operador Hamiltoniano do sistema.

Comparando o trabalho de Schrödinger com o trabalho desenvolvido, anteriormente, por Bohr, este se demonstra muito mais completo, pois:

“... prevê também o seguinte:

- As autofunções são correspondentes a cada autovalor (de energia).
- Prevê o cálculo da probabilidade de um determinado estado.
- Prevê o cálculo da probabilidade de transição de um estado para outro.
- Calcula os momentos angulares orbitais.” (SILVA, 2003, p.2)

## 1.2.2 PRINCÍPIO DA INCERTEZA

Em 1927, quando estava lecionando na Universidade de Leipzig, Werner Heisenberg enunciou o Princípio da Incerteza, também conhecido como Princípio de Heisenberg, sendo este uma característica de sua Mecânica Matricial. Este enunciado é um dos pilares da Mecânica Quântica, onde ressalta que não se podem ter valores precisos para duas grandezas conjugadas, como Posição e Momentum, Tempo e Energia. A determinação conjunta de grandezas conjugadas contém erros não menores que a constante de Planck, que para um mundo macroscópico seriam totalmente desprezíveis. Quando se tem precisão no valor de uma das grandezas conjugadas à outra se torna incerta. Este enunciado se contrapõe a Física Clássica, pois a partir da interação de diversas grandezas pode-se prever como o objeto se comportará.

O Princípio da Incerteza pode ser equacionado das seguintes formas:

$$\Delta p \times \Delta x \geq \hbar \text{ (em termos de momentum } p \text{ e posição } x \text{)}$$

$$\Delta E \times \Delta t \geq \hbar \text{ (em termos de energia } E \text{ e tempo } t \text{)}$$

Para se determinar a posição de um elétron, por exemplo, deve-se fazer incidir algum tipo de radiação, que deve possuir um comprimento de onda da ordem da incerteza com que se quer determinar a Posição. Sendo assim, quanto menor for o seu comprimento de onda (maior frequência), maior será a precisão da determinação, com isso, maior será sua Energia cedida ( $E = hf$ ). Para tanto, o elétron sofrerá um recuo quanto maior for essa Energia, em função do Efeito Compton.

## 1.2.3 O TEMPO



O conceito de Tempo deve ser aqui considerado, levando-se em conta que, segundo Piaget & Garcia (1987), para se ter o entendimento de um conceito deve-se ter formalizado a sua estruturação do conceito em um sistema, que corresponde à última etapa do desenvolvimento psicogenético. Isto ocorre com o conceito de Energia na Teoria Quântica quando esta é relacionada com o Tempo, como sendo conceitos conjugados no Princípio da Incerteza de Heisenberg.

Desde a antiguidade, o Tempo era algo distinto da realidade, pertencente ao mundo das sensações, do irreal. Nesta época, os fenômenos eram considerados cíclicos, onde a Natureza evolui de forma a se repetir. com isso o tempo é considerado da mesma forma. Não se pensava o Tempo como algo que pode ser mensurado, mas como algo destinado a se referir ao passado, presente e futuro, de forma cíclica. Esta concepção do conceito de Tempo só começa a modificar-se quando formalizado como uma grandeza física que pode ser medida e da qual os outros conceitos dependem, como, por exemplo, a velocidade, somente no início do século XV, com Galileu Galilei e, posteriormente, no século XVI com Isaac Newton. A descrição da Mecânica Clássica toma como base o Tempo para a descrição de todos os fenômenos tomando-o como um referencial absoluto e uniforme. Além disto, o Tempo é adotado como parâmetro nas construções matemáticas das equações.

A concepção da Mecânica Clássica sobre o conceito de Tempo só vem a ser modificada com a Teoria da Relatividade de Einstein, no século XX, definindo-o como uma grandeza relativa, dependente de um referencial inercial que observa o fenômeno.

Ainda no século XX, com a Teoria Quântica, a concepção de Tempo, antes somente relacionado a questões do movimento, passa a ser relacionado com o conceito de Energia através do Princípio da Incerteza de Heisenberg. Neste princípio, o Tempo passa a ser uma grandeza conjugada à Energia, tornando-se indeterminado quando a Energia for determinada (medida) e vice-versa. Com isso, o Tempo deixa de ser uma grandeza primária, base das explicações teóricas.

#### **1.2.4 QED: ELETRODINÂMICA QUÂNTICA**

Na década de 40 do século passado, emergem os primeiros desenvolvimentos teóricos que posteriormente formaram o corpo da Eletrodinâmica Quântica, comumente denominada QED, realizadas por Richard Feynman, Freeman Dyson, Julian Schwinger e Sin-

Itiro Tomonaga, onde descreveram uma Teoria Quântica de elétrons, pósitrons, e campo eletromagnético, sendo o primeiro estudo satisfatório sobre a descrição de um campo e da criação e aniquilação de partículas quânticas. Em 1965, por seus estudos inovadores, ganharam o Prêmio Nobel de Física.

Segundo Feynman (2005, p. 65):

“Essa teoria fundamental da interação de luz e matéria, ou campo elétrico e cargas, é o nosso maior sucesso até agora na física. Nessa única teoria, temos as regras básicas para todos os fenômenos comuns, exceto a gravitação e os processos nucleares.”

A essência do QED é a interação de fótons e elétrons. Para tanto, se “olharmos” para interação entre dois elétrons tem-se uma força eletromagnética decorrente da troca, através da emissão e/ou absorção, de fótons virtuais.

No entanto, pode-se questionar se a emissão e/ou absorção de um fóton violaria o princípio da Conservação de Energia. Contudo, na Teoria Quântica, para pequeníssimos intervalos de Tempo, não há necessidade de se impor à idéia de Conservação de Energia\*. O que ocorre neste fenômeno é que o elétron “pega Energia emprestada” para emitir o fóton e a “devolução” desta Energia ocorre quando o fóton é absorvido pelo outro elétron, denominando este processo de *troca virtual de um fóton entre elétrons*. Este fenômeno acarreta mudanças de trajetória dos elétrons decorrentes da troca de fótons (repulsão entre elétrons). Este processo de emissão e absorção de um fóton pode ser representado pelo famoso Diagrama de Feynman (Figura 1).

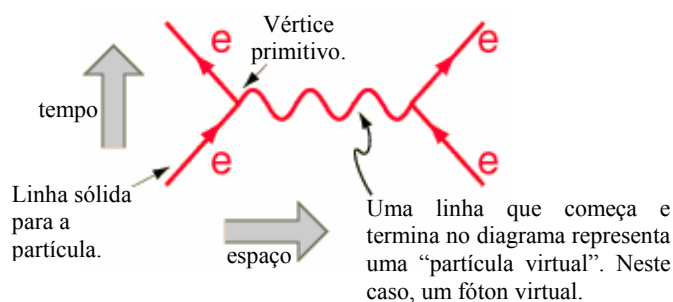


Figura 1. Diagrama de Feynman. (Adaptado de Quantum Physics, s.d.)

Além disto, Feynman (2005) ressalta algumas outras maravilhas da Eletrodinâmica Quântica que, segundo ele, demonstra diversas características e propriedades nas quais a Física Clássica não tem alcance. destaca-se:

“Em primeiro lugar, informa as propriedades de fótons de energia elevadíssimas, raios gamas etc. Previu outra coisa notável: além do elétron, deveria haver outra partícula de mesma massa, mas de carga oposta, denominada pósitron, e

\* Isto pode ser justificado com o Princípio da Incerteza de Heisenberg para energia:  $\Delta E \Delta t \geq \hbar$

as duas, ao se encontrarem, deveriam se aniquilar mutuamente com a emissão de luz ou raios gama. [...] A generalização de que para cada partícula existe uma antipartícula se revela verdadeira.” (Feynman, 2005, p. 65)

Em suma, o desenvolvimento da QED parte de uma concepção quântica da interação eletromagnética onde a mediação desta interação é feito por fótons virtuais que, como dito, pelo Princípio da Incerteza, são admitidos violar a Conservação da Energia ainda que “localmente”, como uma “flutuação do vácuo”. Assim, até mesmo para a Teoria Quântica, a Conservação da Energia, tão cara à Física Clássica, é sempre tratada como uma lei teórica fundamental. A QED utiliza a idéia da violação da Conservação da Energia não como uma anomalia curiosa do corpo teórico, mas como um pressuposto fundamental para que ocorra a emissão de fótons virtuais, que mediam a interação eletromagnética entre partículas reais. Findo o espaço de tempo necessário à interação, a Conservação da Energia é restaurada. Assim, dentro da Teoria Quântica, dualisticamente, coabita tanto a idéia de conservação como a de não conservação como princípios de trabalho fundamentais. A própria QED concebe o vácuo como sendo habitado por um sem-número de partículas virtuais, pares de partículas e anti-partículas, que são criadas e aniquiladas em um intervalo menor que o tempo de Planck, fazendo com que a distribuição de Energia não seja. Esta descrição ficou conhecida como *mar de Dirac* (PETRONI & VIGIER, 1983). Pode-se, portanto, falar de uma dualidade onde, conceitualmente, se impõe a Conservação da Energia em grandes escalas de tempo e se *aproveita* da violação da Conservação da Energia para intervalos de tempo muito pequenos de forma a tornar factível a emissão de partículas virtuais e modelar a interação eletromagnética, propósito da QED.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo procurou descrever a evolução do conceito de Energia na Teoria Quântica, numa visão histórico-epistemológica que promove a mudança ontológica tão necessária para que os alunos compreendam corretamente os conceitos físicos, favorecendo a interdisciplinaridade e o aprendizado articulado e contextualizado. Procuramos ressaltar a importância dessa visão histórico-epistemológica e ontológica, principalmente em teorias que, tal como a Quântica, aparentam complexidade e provocam estranheza nos estudantes. Detemos-nos no conceito de Energia por se tratar de:

“... uma idéia abstrata, teórica, inventada por cientistas para ajudar na investigação quantitativa de fenômenos e sua importância se insere no fato de que, para todos os fenômenos até agora estudados, uma lei rigorosa de conservação é aplicável.” (DUIT, 1987, apud BRÜCKMANN, DRUZIAN & SANTOS, 2005)

Tal como anteriormente, ressalta-se a importância da formação dos professores, pois estes devem fazer com que os estudantes se tornem indivíduos pensantes, que constroem e reconstróem, não meros repetidores do que lhes foi repassado, promovendo o entendimento de conteúdos abstratos, demonstram que não são desconexos da sua realidade e vivência. Deve-se propiciar ao indivíduo a possibilidade de vislumbrar outras facetas e buscar, também, apoio na História das Ciências, enfatizando suas rupturas e saltos, sejam eles científicos ou socioculturais, promovendo a evolução conceitual e favorecendo a interdisciplinaridade e o aprendizado articulado e contextualizado (BUTLAND, 2005).

## REFERÊNCIAS

- BATHISTA, André Luis Bonfim. **Equação de Schrödinger e Suas Aplicações**. Disponível em: <br.geocities.com/andreathista/equacao\_schroedinger\_qq.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2008.
- BRASIL. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio**. Parte III – ciências da natureza, matemática e suas tecnologias, Brasília : MEC/SEMT, 2000.
- BUCUSSI, Alessandro Aquino. **Introdução ao Conceito de Energia**. (Texto de Apoio ao Professor de Física, v.17, n.3), Porto Alegre: Instituto de Física da UFRGS, 2006.
- BUTLAND, Valéria Rodrigues Graça. **Um Estudo sobre o uso Pedagógico da História da Ciência no Ensino de Física**, 2005. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) - Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2005. Orientador: Renato P. dos Santos.
- CIMA, Vanderlei Andre. **Tempo... O que é o tempo para a Física???** Disponível em: <http://www.novafisica.net/pensar/tempo-fis.htm>. Acesso em: 03 set. 2008.
- CHI, Michelene T.H. et al.. **Conceptual change within and across ontological categories: Examples from learning and discovery in science**. in GIÈRE, Ronald N. (Ed.). Cognitive models of Science: Minnesota Studies in the philosophy of Science. Minnesota: University of Minnesota Press, 1991.
- CONAN, Colin. **A História Ilustrada da Ciência: a ciências nos séculos XIX e XX**. v. 4. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2001.

- DOS SANTOS, Carlo Alberto. **Modelo Atômico de Bohr: Fatos Históricos**. 2002. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/modeloboehr/modeloboehrhistor.html>>. Acesso em: 23 ago. 2008.
- DRUZIAN, Aline; BRÜCKMANN, Iades A. & SANTOS, Renato P. dos. Construção de um Teste através de um Inventário do Conceito de Energia. In: **Atas do V ENPEC - Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências**, Bauru/SP, ABRAPEC, 28 de Outubro a 2 de Dezembro de 2005, Bauru: ABRAPEC - Associação Brasileira de Pesquisa em Ensino de Ciências, 2005.
- FEYNMAN, Richard. **QED: the strange theory of light and matter**. Great Britain: Penguin Books, 1990.
- \_\_\_\_\_ **Física em 12 Lições: fáceis e não tão fáceis**. Trad.: Ivo Korytowski. Rio de Janeiro: Ediouro, 2005.
- FONSECA, Pedro Manuel Cabral da. **Física Quântica: esboço histórico e perspectivas históricas**. Disponível em: <<http://www.pedro-fonseca.com/pt/filosofia/fq.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2008.
- GALILI, Igal & BAR, Varda. Motion Implies Force: Where to Expect Vestiges of the Misconceptions? **International Journal of Science Education**, v. 14, n. 1, p. 63-81, 1992.
- GRECA, Ileana Maria; MOREIRA, Marco Antonio; HERSCOVITZ, Victoria. Uma Proposta para o Ensino de Mecânica Quântica. **Revista Brasileira no Ensino de Física**, v. 23, n. 4, p. 444-457, dez. 2001.
- GRECA, Ileana Maria Rosa. **Construindo Significados em Mecânica Quântica: resultados de uma proposta didática aplicada a estudantes de física geral**. 2000. 284 f. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Porto Alegre, 2000. Orientador: Marco Antonio Moreira.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física**. Trad.: Ronaldo Sérgio de Biasi. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2003, v. 4.
- KUHN, Thomas S. **A tensão essencial**. Trad.: Rui Pacheco. Rev.: Artur Morão. Lisboa: Edições 70, 1977.

- MEDEIROS, Alexandre; GERMANO, Auta Stella; ERNANDES; Francisco; TERTULIANO, João; COSTA; Renilton; CAMÊLLO; Ricardo. O Ensino Atual da Física do Século Passado. In: **Atas do XVI Simpósio Nacional de Ensino de Física**, Rio de Janeiro, 2005.
- MORTIMER, Eduardo Fleury. Construtivismo, mudança conceitual e ensino de ciências: para onde vamos? **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 1 n. 1 p. 20-39, abr. 1996.
- NEPOMUCENO, Erivelton Geraldo; FILHO, João Antônio Corrêa. **Mecânica Quântica: uma resposta da ciência, um método para o pensamento científico**. São João del Rei : Vertentes, n.17, p. 108-116, jan.-jun. 2001.
- PAULO, Iramai Jorge Cabral de. **A Aprendizagem Significativa Crítica de Conceitos da Mecânica Quântica Segundo a Interpretação de Copenhagen e o Problema da Diversidade de Propostas da Inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio**. 2006. 219f. Tese (Doutorado em Ensino de Ciência) - Universidad de Burgos, Burgos, 2006. Orientador: Marco Antonio Moreira
- PESSOA Jr, Osvaldo. **Conceitos e Interpretações da Mecânica Quântica: o teorema de Bell**. Disponível em: <[www.ppginf.ucpel.tche.br](http://www.ppginf.ucpel.tche.br)>. Acesso em: 10 jul. 2008.
- PESSOA Jr, Osvaldo. **Conceitos de Física Quântica**. v. 1, São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003.
- PESSOA Jr, Osvaldo. Interpretações da Teoria Quântica e as Concepções dos Alunos do Curso de Física. **Investigações em Ensino de Ciências**. v. 7, n. 2, p. 107-126, 2002.
- PESSOA Jr, Osvaldo. Interferometria, Interpretações e Intuição: uma introdução conceitual à Física Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 19, n. 1, p. 27-48, mar. 1997.
- PETRONI, Nicola Cufaro; VIGIER, Jean Pierre. Dirac's Aether in Relativistic Quantum Mechanics. **Foundations of Physics**. v. 13, n. 2, p. 253-286, 1983.
- PIAGET, J., GARCIA, R. **Psicogênese e História das Ciências**. Lisboa : Publicações Dom Quixote, 1987.
- PIAGET, Jean (org). **Lógica e Conhecimento Científico**. v. 2. Trad.: Francisco Sardo Sousa Dias. Porto : Livraria Civilização, 1981.

- PINTO, Custódio; ZANETIC, J. É Possível Levar a Física Quântica para o Ensino Médio? **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 16, n. 1, p. 7-34, abr. 1999.
- QUANTUM Physics. s.d.. Disponível em: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/hframe.html>>. Acesso em: 24 ago. 2008.
- TERRAZZAN, Eduardo Adolfo. **A Inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino de Física na Escola do 2º Grau**. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 9, n. 3, p. 209-214, dez/1992.
- TEMPO: **E afinal, o que é o tempo?** s.d. Disponível em: <<http://efisica.if.usp.br/mecanica/curioso/tempo/tempo/>>. Acesso em: 3 set. 2008.