

Universidade de Évora

Mestrado em Física para o Ensino

**Uma Aventura do Átomo:
Contributo para a construção de uma narrativa
histórica com valor pedagógico**

Jorge Miguel Varela Magarreiro

**Orientadores: Professora Doutora Mariana de Jesus Pedreira Valente
Professor Doutor António José Estêvão Grande Candeias**

Évora

2007

Universidade de Évora

Mestrado em Física para o Ensino

**Uma Aventura do Átomo:
Contributo para a construção de uma narrativa
histórica com valor pedagógico**

Jorge Miguel Varela Magarreiro



160 779

**Orientadores: Professora Doutora Mariana de Jesus Pedreira Valente
Professor Doutor António José Estêvão Grande Candeias**

Évora

2007

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer e salientar a disponibilidade, compreensão e apoio que me foram prestados pelos meus orientadores, Professores Mariana Valente e António José Candeias.

Agradeço, também:

Em especial à Nucha, pelo permanente apoio e compreensão. Agradeço-lhe pela dedicação e força nos momentos de maior dificuldade. Sem o seu contributo, esta tese não teria sido possível.

À Inês, pelo incentivo e colaboração que sempre me concedeu.

À Guilhermina e à Teresa, pela preciosa ajuda prestada nas línguas francesa e inglesa, respectivamente.

Ao Filipe e ao Raposo, pelas ideias partilhadas e pelo companheirismo.

Aos meus pais, irmã, avós e tia, pela ajuda e apoio indispensáveis em todos os momentos. A todos eles agradeço os valores que me inculcaram e que fizeram de mim a pessoa que sou hoje.

À minha sobrinha Bárbara que, mesmo sem o saber, foi motivo de inspiração.

Por último, quero dedicar este trabalho à memória de Harmonia Filipe Varela e de Vítor Chumbo, para quem a conclusão desta tese seria motivo de orgulho e enorme satisfação.

Resumo

Num mundo dependente do progresso científico-tecnológico, é com apreensão que assinalamos, a par de alguns autores, o desinteresse pela ciência na educação científica escolar. Consideramos, portanto, imperativo reflectir acerca do processo ensino-aprendizagem das ciências.

Neste trabalho, destacamos a função que a História e Filosofia das Ciências pode exercer na introdução de alguns aspectos associados à natureza do conhecimento científico. A sua utilização pedagógica, fruto de trabalhos de investigação realizados por professores, poderá constituir um recurso educativo que, ao promover o contacto com as problemáticas que se colocaram aos cientistas, estimula nos alunos a curiosidade e a imaginação, indispensáveis à aprendizagem das ciências. Tendo por base este pressuposto, decidimos elaborar a «Aventura do Átomo», uma narrativa histórica alicerçada na utilização pedagógica da História e Filosofia das Ciências, onde procuramos atribuir sentido, significado e interesse ao conceito de átomo.

Paralelamente, e a partir de alguns dos conteúdos desta narrativa, pretende-se desenvolver uma aplicação multimédia.

The Atom Adventure

Abstract

In a world dependent on scientific and technological development, it is with apprehension that we and some authors notice a lack of interest towards scientific education in schools. Thus, we consider the reflection on the science learning-teaching process fundamental.

This paper highlights the important role played by the History and Philosophy of Science concerning the introduction of certain aspects related to the nature of scientific knowledge. Its pedagogical usage, resulting from research papers carried out by teachers, may constitute an educational resource capable of stimulating students' curiosity and imagination, both necessary to the learning of sciences, by putting them in contact with the problems that troubled scientists. Bearing this in mind, we decided to create the «Adventure of the Atom», a historical narrative based on the pedagogical use of the History and Philosophy of Science, in which we try to provide sense, meaning and interest to the concept of the atom.

Simultaneously, it's also our goal to develop some contents of this narrative into a multimedia application.

Índice

Resumo	i
Abstract	iii
Índice	v
Índice de Figuras	ix
Índice de Quadros	xiii
Introdução	1

1.ª Parte

Problemática e desenvolvimento metodológico

Introdução.....	7
------------------------	----------

Capítulo 1 – De onde vêm as ideias que nos vêm?

1.1. Motivações e objectivos do trabalho	11
1.2. Hans von Baeyer e Rómulo de Carvalho: Uma questão de “ingredientes”	14
1.3. A «Aventura do Átomo»	21

Capítulo 2 – Reflexões sobre a utilização da História da Ciência no ensino e aprendizagem da Ciência

2.1. O papel do professor no ensino construtivista	25
--	----

2.2. Contributos da História e Filosofia da Ciência para o ensino das Ciências	34
---	----

Capítulo 3 – A favor de uma História com vida e que convida

3.1. Utilização da História da Ciência no ensino	43
3.2. Surpresas históricas na narrativa histórica	53
3.3. O que não fazem os manuais escolares?	61

Capítulo 4 – O suporte multimédia da «Aventura do Átomo»

4.1. Pertinência da aplicação multimédia	67
4.2. Etapas subjacentes à concretização do projecto virtual	71

2.^a Parte

Aventura do Átomo

Introdução.....	75
------------------------	-----------

Capítulo 1 – A realidade atómica e o movimento browniano

1.1. Átomos..., como sabemos que eles existem?	81
1.2. Taming the Atom – “Estar preso” ao átomo	85

Capítulo 2 – Teoria Atómica e Teoria Cinética

2.1. Almas Gémeas	91
2.2. Um começo: uma exaltação e muita polémica	91
2.3. As primeiras leis dos gases e a genialidade de Daniel Bernoulli	94

2.4. O contributo de Newton	100
2.5. Dalton e o nascimento da química moderna	103
2.6. Grande polémica - Dalton <i>versus</i> Gay-Lussac: <i>duas cabeças, duas sentenças</i>	108
2.7. Amedeo Avogadro anuncia a sua mensagem de paz	112
2.8. O congresso de Karlsruhe e a «memória» de Avogadro: de uma hipótese a uma lei	117
2.9. O número <i>N</i> de Avogadro	122
2.10. O átomo dos físicos	124
2.11. Breves referências à termodinâmica clássica	125
2.12. Recuperação de uma outra «memória» e o desenvolvimento da teoria cinética no século XIX	134

Capítulo 3 – O “louco” final do século XIX

3.1. O acaso em socorro das moléculas e dos átomos	139
3.2. O triunfo da teoria cinética	141
3.3. A natureza estatística da segunda lei da termodinâmica	147
3.4. Boltzmann explica a misteriosa entropia	151
3.5. Chegados ao átomo – Os novos raios e o electrão, descobertas que marcaram o final do século XIX	154
3.6. Conflito científico-filosófico no final do século XIX	163

Capítulo 4 – A explicação do misterioso movimento e a afirmação do átomo enquanto entidade física

4.1. «Partículas dançantes» – um fenómeno curioso	171
4.2. « <i>En marche vers la terre promise</i> »	174
4.3. <u>1905</u> : O <i>ANNUS MIRABILIS</i> de EINSTEIN	181
4.4. O novo poeta dos átomos	185

4.5. Estudos em termodinâmica estatística	188
4.6. A explicação do movimento browniano: suprema inspiração do novo poeta dos átomos	191
4.6.1. A tese de doutoramento de Einstein	192
4.6.2. O primeiro artigo de Einstein sobre o movimento browniano	196
4.6.3. Smoluchowski: uma justa homenagem	200
4.7. A prova final: confirmação experimental obtida por Perrin de alguns resultados previstos	202
4.7.1. Evidência experimental para a teoria de Einstein	203
4.7.2. A sobredeterminação do número de Avogadro	206
4.7.3. Contributo dado pela explicação do movimento browniano para a clarificação da natureza estatística da segunda lei da termodinâmica	207
4.8. Das hipóteses atômicas à possibilidade de “contar”, “ver”, “tocar” os átomos.....	209
Considerações finais	213
Bibliografia	219
Anexos	231

Índice de Figuras

Figura 1: <i>L'Inspiration du poète</i>	11
Figura 2: A Coreia do Norte efectuou ontem um ensaio nuclear	22
Figura 3: O “Diálogo”	50
Figura 4: Imagem relativa à introdução do suporte multimédia «Aventura do Átomo»	67
Figura 5: A rosa do Príncipezinho de Saint-Exupéry	73
Figura 6: Átomo de mercúrio	81
Figura 7: Imagem de átomos de silício na superfície de um cristal	83
Figura 8: O Príncipezinho e a raposa	85
Figura 9: Albert Einstein (1879-1955)	87
Figura 10: Jean Perrin (1870-1942)	88
Figura 11: O Príncipezinho no asteróide	88
Figura 12: Retrato idealizado de Leucipo (490-? a.C.)	92
Figura 13: Demócrito (460-370 a.C.)	92
Figura 14: Robert Boyle (1627-1691)	95
Figura 15: Daniel Bernoulli (1700-1782)	96
Figura 16: Ilustração elaborada por Bernoulli no seu livro <i>Hydrodynamica</i> , referente à sua <i>teoria cinética dos gases</i>	97
Figura 17: Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850)	99
Figura 18: Esquema relativo à lei de Boyle-Mariotte	100
Figura 19: Isaac Newton (1642-1727)	100
Figura 20: John Dalton (1766-1844)	103
Figura 21: Lista contendo os símbolos que Dalton imaginou para os elementos químicos, assim como, os pesos relativos de cada um	106
Figura 22: Representação elaborada por Dalton dos compostos ácido oxálico, ácido cítrico, ácido acético e ácido tartárico	107

Figura 23: Esquema relativo à formação das moléculas de água de acordo com o pensamento de Gay-Lussac	110
Figura 24: Jöns Jakob Berzelius (1779-1848)	112
Figura 25: Amedeo Avogadro (1776-1856)	113
Figura 26: Esquema relativo à formação das moléculas de água de acordo com o pensamento de Avogadro	113
Figura 27: Massas de 1 litro de oxigénio e 1 litro de hidrogénio	115
Figura 28: Caricatura de Avogadro	117
Figura 29: Friedrich August Kekulé (1829-1896)	119
Figura 30: Stanislao Cannizzaro (1826-1910)	119
Figura 31: Dmitri Ivanovich Mendeleev (1834-1907)	121
Figura 32: Esquema de uma transformação física: variação de distâncias e disposições relativas de quatro moléculas, sem alteração da sua constituição	124
Figura 33: Esquema de uma transformação química: alteração da constituição das moléculas em reacção	125
Figura 34: Julius Mayer (1814-1878)	127
Figura 35: James Joule (1818-1889)	127
Figura 36: Hermann von Helmholtz (1821-1894)	127
Figura 37: Sadi Carnot (1796-1832)	128
Figura 38: Rudolf Clausius (1822-1888)	129
Figura 39: William Thomson (1824-1907)	130
Figura 40: Exemplo de um laboratório do século XIX	139
Figura 41: James Clerk Maxwell (1831-1879)	141
Figura 42: Ludwig Boltzmann (1844-1906)	145
Figura 43: Demónio de Maxwell	148
Figura 44: Representação esquemática de um tubo destinado ao estudo dos efeitos das descargas eléctricas no seio dos gases rarefeitos	156
Figura 45: Wilhelm Roentgen (1845-1923)	157

Figura 46: Imagem de uma mão com um estilhaço	158
Figura 47: Antoine Henri Becquerel (1852-1908)	158
Figura 48: Pierre (1859-1906) e Marie Curie (1867-1934), no seu laboratório em 1898	159
Figura 49: Joseph John Thomson (1856-1940)	161
Figura 50: Dispositivo com o qual Thomson descobriu o electrão	162
Figura 51: Wilhelm Ostwald (1853-1932)	164
Figura 52: Ernst Mach (1838-1916)	165
Figura 53: Max Planck (1858-1947)	166
Figura 54: Robert Brown (1773-1858)	172
Figura 55: Microscópio utilizado por Brown	172
Figura 56: Imagem representativa da vibração de um grão de pólen em suspensão na água	173
Figura 57: Esquema de uma possível trajectória descrita por um grão de pólen (ou por uma partícula de dimensões semelhantes) em suspensão na água.	173
Figura 58: Henri Victor Regnault (1810-1878)	175
Figura 59: William Stanley Jevons (1810-1878)	175
Figura 60: Giovanni Cantoni (1818-1897)	176
Figura 61: Sir William Ramsey (1852-1816)	178
Figura 62: Representação esquemática do movimento browniano	179
Figura 63: Karl von Nägeli (1817-1891)	179
Figura 64: A Pintura de Salvador Dali, <i>A Persistência da Memória</i> , pintado no século XX, em 1931.	183
Figura 65: Pintura de Picasso na fase cubista, <i>Cabeza de hombre</i> (1910-11)	183
Figura 66: Escultura de Einstein, em exposição ao público no Instituto Max Planck para a História da Ciência, em Berlim	186
Figura 67: Josiah Willard Gibbs (1839-1903)	189
Figura 68: Excerto do artigo de Einstein sobre o movimento browniano	190

Figura 69: Marian Ritter von Smolan-Smoluchowski (1872-1917)	200
Figura 70: Representação esquemática do movimento browniano	203
Figura 71: Tabela relativa aos resultados experimentais obtidos por Perrin, fruto da utilização da teoria formulada por Einstein no seu primeiro artigo sobre o movimento browniano	205
Figura 72: Valores de N obtidos por diferentes meios	206

Índice de Quadros

Quadro 1: Parâmetros considerados na a nossa incursão aos conteúdos históricos presentes em alguns dos manuais escolares dos oitavo e nono ano de escolaridade

62

Introdução

Vivemos numa época de aceleradas mudanças, onde a globalização dita as suas leis. As sociedades modernas estão cada vez mais interdependentes, tanto ao nível económico e tecnológico, como ao nível da informação. Enquanto estas novas sociedades da informação se desenvolvem, os inúmeros problemas a nível mundial, como a guerra, o terrorismo, a desigualdade e a pobreza, continuam a persistir. Portanto, há um longo caminho a percorrer até que a globalização afecte áreas tão importantes como a saúde, a justiça, o desenvolvimento sustentado e a educação. O mundo está a mudar, contudo, não parece claro em que direcção.

Estas mudanças têm tido a sua repercussão na escola, que se tornou ainda mais complexa e heterogénea. O aumento da escolaridade obrigatória, o crescimento da interculturalidade, o aumento dos conflitos na sala de aula, a perda da tradicional autoridade do professor e o fácil acesso às novas tecnologias de informação e comunicação por parte dos alunos, representam um desafio permanente para os professores. No domínio do ensino das ciências, no qual nos enquadrámos, os desafios que se colocam são ainda maiores.

A educação científica tem-se vindo a deparar com um gravíssimo problema – a alienação dos alunos face ao estudo das ciências. Os cursos de ciências carregam consigo, frequentemente, a reputação de serem “duros”, obscuros e difíceis, sendo considerados, por isso, inacessíveis e irrelevantes por um elevado número de estudantes. Respondendo a esta percepção, muitos tendem a relegar a sua experiência com a ciência para um plano absolutamente secundário. Como resultado, regista-se um afastamento dos jovens das profissões ligadas às áreas científicas.

Apesar da ampla desmotivação para a aprendizagem das ciências, constatamos que os jovens estão cada vez mais dependentes das novas tecnologias (telemóveis, computadores, consolas, etc.), sem que isso desperte neles o interesse pelo estudo das ciências. A utilização da História e Filosofia da Ciência, mediada por professores e fruto dos seus trabalhos de investigação, é uma das vias que pode contribuir para motivar os alunos para a aprendizagem das ciências, de acordo com alguns investigadores (Matthews, Wang e Marsh, etc). A História e Filosofia da Ciência poderá tornar-se num importante instrumento pedagógico, capaz de ajudar a desenvolver um pensamento menos dogmático. Com ele poderemos dar relevo a algumas das características mais

marcantes do pensamento científico – os problemas e a imaginação. Este foi um dos pressupostos que contribuiu para a elaboração de uma narrativa histórica que tenha valor pedagógico. A nossa insatisfação pela forma dogmática com que alguns aspectos são trabalhados nos manuais escolares, nomeadamente, com a abordagem histórica efectuada por muitos manuais escolares a questões relacionadas com o surgimento e desenvolvimento da teoria atómica, foi o ponto de partida para esta investigação. Pretendemos desenvolver uma narrativa que complemente a história apresentada nos manuais escolares, ou seja, uma narrativa histórica onde a ideia de átomo adquira significado e interesse. Esta deverá evidenciar os problemas, levantar questões, humanizar e ajudar a experienciar a ciência como uma construção humana singular.

A utilização da História e Filosofia da Ciência representa uma nova forma de actuação pedagógica e didáctica que, ao invés de contribuir para encher a cabeça dos alunos de ideias inertes, pode ajudá-los a contactar com um conhecimento vivo e com valor. Nas últimas duas décadas e meia, temos assistido ao reconhecimento da sua função formativa, como variada bibliografia o testemunha (Matthews, Purrington, etc.). Incluindo duas disciplinas distintas, ambas contribuem, a seu modo, para tornar mais inteligível a ciência.

No ensino das ciências, considerações históricas e filosóficas são muito úteis. Como pretendemos ir mostrando, estas podem contribuir para uma concepção menos dogmática da ciência e dos métodos científicos. São também de extrema utilidade para qualquer inserção consciente e responsável na realidade sócio-cultural. Todavia, importa referir que existe uma preocupação actual em torno da introdução da História e Filosofia da Ciência no ensino. Não basta apenas utilizá-la, há que saber como. Neste momento, muitos autores alertam para o perigo das «pseudohistórias», defendendo o rigor na utilização da História e Filosofia da Ciência.

Com a construção da nossa narrativa, cujo tema principal é a emergência do átomo do reino da especulação para o da realidade física, pretendemos colocar ao alcance de professores e alunos um instrumento capaz de combater o desinteresse e o dogmatismo associado à aprendizagem da ciência, em geral, e do conceito de átomo, em particular. A escolha do tema supracitado prende-se com vários motivos. De entre eles, saliente-se, o elevado nível de abstracção que este conceito acarreta e as inevitáveis dificuldades que os alunos sentem na sua compreensão.

Efectuar um estudo acerca do desenvolvimento científico da ideia de átomo é sempre uma tarefa árdua e de imensa responsabilidade, sobretudo devido à enorme abrangência e controvérsia deste tema. De entre a multiplicidade de assuntos relacionados com o atomismo, consideramos de particular importância conhecer o caminho traçado pelo átomo até à sua afirmação enquanto realidade física. Ao longo dos tempos a ideia de átomo esteve sempre rodeada por polémicas, ocupando, muitas das vezes, o cerne dessas polémicas. Como tal, procuramos realçar a controvérsia que se gerou em torno da realidade física dos átomos, mais concretamente, nos finais do século XIX e inícios do século XX, e que acabou por ser resolvida ainda antes do final da primeira década do século XX. Os ataques à hipótese atômica de Demócrito e a polémica que se gerou entre Dalton e Gay-Lussac em torno da concepção atômica também serão alvo de merecido destaque. O desenvolvimento da teoria cinética dos gases, o surgimento da mecânica estatística, a determinação do número de Avogadro e a teoria do movimento browniano são alguns dos outros destaques da nossa aventura. Julgamos ser possível que através da exploração destes e de outros assuntos, professores e alunos poderão estabelecer laços mais profundos com o mundo atômico.

O rigor deste trabalho jogar-se-á na coerência interna e na lógica do mesmo. Nesse sentido, organizámo-lo em duas grandes partes. Na primeira parte, “Problemática e desenvolvimento metodológico”, são apresentadas as questões que nos conduziram a uma investigação histórica; é feita uma pequena abordagem a questões relacionadas com o ensino das ciências; e é explorada a metodologia seguida na construção da narrativa. Na segunda parte, e tendo por base os ensinamentos retirados da primeira, é desenvolvida a nossa narrativa histórica com valor pedagógico, intitulada «Aventura do Átomo». Ao longo de todo o nosso trabalho procuramos fazer uso de uma linguagem simples, mas cuidada.

O nosso objectivo é fazer da «Aventura do Átomo» uma narrativa capaz de contribuir para que o atomismo e o conceito de átomo adquiram sentido, significado e interesse e que se possa tornar numa narrativa “preciosa” tendo um bom motivo a seu favor “que a distinga do silêncio” (Bruner, 2000, p.163). O sentido, o significado e o interesse que poderá adquirir, na mente dos alunos, o atomismo e o conceito de átomo, representam esse bom motivo.

Cientes do importante papel que as novas tecnologias de informação e comunicação podem desempenhar no processo ensino-aprendizagem das ciências,

propomo-nos desenvolver uma aplicação multimédia baseada na nossa narrativa histórica.

No decurso do nosso trabalho, sempre que se considerar que se pode perder algum valor linguístico numa eventual tradução para língua portuguesa, optar-se-á por manter a versão da língua original.

Conhecedores dos elevados riscos associados a um trabalho desta natureza, temos como pressuposto que a nossa própria relação com o conhecimento científico sairá reforçada. Nomeadamente, teremos a oportunidade de perceber a complexidade associada à natureza do conhecimento científico, o que tentaremos evidenciar ao longo do nosso trabalho.

1ª Parte

Problemática e Desenvolvimento metodológico

Introdução

A natureza da presente dissertação impõe uma explicitação adequada e rigorosa das problemáticas que estiveram na sua génese, assim como, da metodologia utilizada para a sua concretização. É o que se fará nesta primeira parte do trabalho. Para isso, e na procura de definir o âmbito mais restrito do nosso trabalho, efectuámos uma revisão exaustiva da bibliografia sobre a utilização da História e Filosofia da Ciência na educação em Ciências.

Utilizando uma metodologia de contrastes, faremos emergir as questões que nos acompanharão ao longo da elaboração da narrativa histórica (capítulo 1). No capítulo 3, incidiremos, entre outros assuntos, sobre as escolhas metodológicas para a construção da referida narrativa. A importância que a História e Filosofia da Ciência poderá ter no ensino das ciências será debatida nos capítulos 2 e 3. Por fim, no quarto e último capítulo, apresentaremos a nova plataforma multimédia que irá complementar a narrativa histórica que pretendemos criar. Mais detalhadamente diremos:

- Capítulo 1 – De onde vêm as ideias que nos vêm?

O título do capítulo fala por si. Aquilo que pretendemos aqui é explicitar as problemáticas que nos conduziram a uma investigação histórico-filosófica e que culminaram com a elaboração da *Aventura do Átomo*. Procuramos, também, justificar a influência que tiveram as obras de *Taming the Atom – the Emergence of the Visible Microworld*, de Hans von Baeyer e *História do Átomo*, de Rómulo de Carvalho na criação da problemática e consequente desenvolvimento da nossa narrativa.

Para além das obras mencionadas, fazem parte do corpus deste capítulo alguns manuais escolares dos oitavo e nono anos de escolaridade e textos de História da Ciência que considerámos relevantes sobre a história do átomo. Autores como Leite e Matthews merecem também o nosso destaque.

- Capítulo 2 – Reflexões sobre a utilização da História da Ciência no ensino e aprendizagem da Ciência

As reflexões que apresentamos centram-se, essencialmente, nas vantagens que a utilização de um instrumento metodológico como a História e Filosofia da Ciência poderá ter no âmbito do ensino construtivista das ciências.

Numa primeira parte, e relativamente ao papel do professor, destacamos a perspectiva construtivista muito inspirada em Vygotsky. Autores como Neto e Kubli foram essenciais.

Na segunda, e última parte do capítulo, procuramos demonstrar como é que a História e Filosofia da Ciência pode contribuir para desenvolver uma sensibilidade sobre o valor da ciência, assim como, para melhorar a compreensão que os alunos têm da ciência e da natureza do conhecimento científico. Para a sua concretização, mencione-se o contributo de autores como Matthews, Janeira, Kragh, Wang e Marsh.

- Capítulo 3 – A favor de uma História com vida e que convida

No final da primeira década do século XXI, vive-se, no domínio da educação científica uma realidade preocupante: apesar das sociedades desenvolvidas assentarem cada vez mais na ciência e tecnologia, regista-se um nítido desinteresse dos jovens pelo estudo das ciências e, conseqüentemente, um decréscimo acentuado na frequência dos cursos de ciências e engenharias.

Neste capítulo, procuramos indicar alguns caminhos que possibilitem inverter a actual e preocupante realidade. Nesse sentido destacamos, uma vez mais, a importância que a História e Filosofia da Ciência pode adquirir na reaproximação entre os alunos e a ciência. Os textos de determinados cientistas e as narrativas históricas com valor pedagógico, são os meios que privilegiamos para a aplicação didáctica da História e Filosofia da Ciência. Tendo em consideração que a nossa escolha recaiu sobre a elaboração de uma narrativa histórica com valor pedagógico, apresentamos, paralelamente, as opções metodológicas para a construção da mesma.

No último subcapítulo, a partir de uma pequena incursão, expressamos a nossa insatisfação com a história, relacionada com a teoria atómica, que

encontramos nalguns manuais escolares dos oitavo e nono anos de escolaridade de Ciências Físico-Químicas.

Para a concretização deste capítulo, considerámos relevantes autores como Kubli, Kindi, Kuhn, Peña, Deus, Koestler, Galileu, Bruner, Stuewer e Leite.

- Capítulo 4 – O suporte multimédia da «Aventura do Átomo»

Os desafios que se colocam aos homens e mulheres do século XXI passam pelo domínio das novas tecnologias, sem as quais não conseguirão responder às exigências do quotidiano. Tornou-se, assim, necessário repensar a educação e foi nesse contexto que se privilegiou a utilização das Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) em contexto escolar. As TIC são um elemento constituinte do ambiente de aprendizagem. Elas podem apoiar o desenvolvimento das capacidades dos alunos, assim como, a aprendizagem de conteúdos de uma forma lúdica e interessante. Tendo em consideração estes argumentos, surgiu a ideia de criar uma plataforma multimédia sobre a hipótese atómica, baseada na «Aventura do Átomo» que construímos.

Para a edificação deste capítulo foram determinantes autores como João Paiva e Johann Fouché.



Capítulo 1 – De onde vêm as ideias que nos vêm?

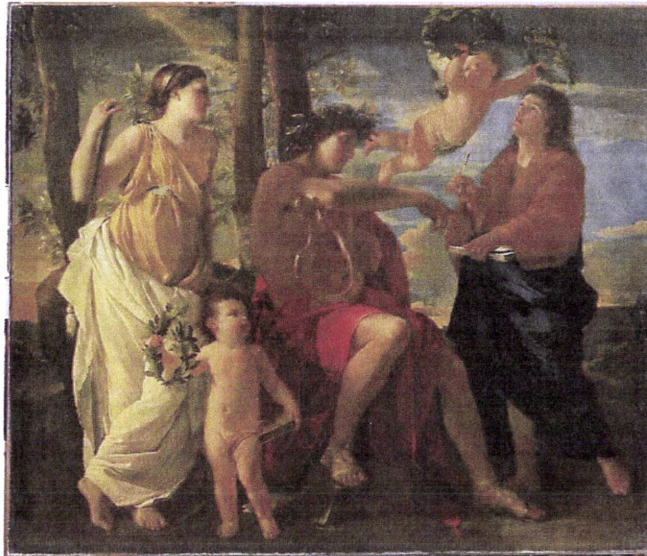


Figura 1: L'Inspiration du poète ¹

1.1. Motivações e objectivos do trabalho

A “inspiração do poeta” no quadro em epígrafe remete para a origem das coisas: inspiração para o poeta, problema para o cientista.

O conhecimento científico desenvolve-se, na perspectiva de alguns filósofos da ciência, a partir de problemas ou questões que os cientistas enfrentaram. O conhecimento científico associado às práticas escolares é, muitas vezes, dogmático sem que seja evidenciada a sua origem e o seu carácter de construção humana (um exemplo desse dogmatismo é a abordagem histórica efectuada por muitos manuais escolares a questões relacionadas com o surgimento e desenvolvimento da teoria atômica). Este nosso pressuposto, desenvolvido com base na nossa experiência de professor afirmou o mote para a nossa problemática: “de onde vêm as ideias que nos vêm?”

As ideias que nos surgem têm, sempre, uma procedência, ou seja, são sempre influenciadas pelas diferentes experiências com o mundo e com a cultura. Ao professor cabe uma tarefa que é levar os alunos a aprender a pensar cientificamente. Precisa o professor de dispor de instrumentos que o ajudem a ultrapassar a forma dogmática com que o conhecimento científico é apresentado na maioria das vezes.

¹ Imagem retirada do livro de Jean-Paul Auffray, *O Átomo* (2001, p. 11). Pintura de Nicolas Poussin (1594-1665), *A inspiração do poeta*. Esta pintura encontra-se no Museu do Louvre, em Paris.

A História e Filosofia da Ciência é um recurso privilegiado para ultrapassar a situação apresentada, permitindo desenvolver respostas para a questão colocada inicialmente “de onde vêm as ideias que nos vêm” e, com isso, estabelecer laços interessantes com o conhecimento científico. Esses laços permitirão que os alunos interiorizem que a ciência representa um conhecimento com grande especificidade, onde a imaginação e as problemáticas ganham importância. Neste sentido, Matthews, citado por Carvalho e Vannuchi (2000), destaca a importância da História e Filosofia da Ciência:

“Há duas formas de considerar a introdução da História e Filosofia da Ciência nos currículos de ciência em termos de conteúdo: a história e a filosofia da ciência como *elementos que ajudarão* a compreender os conceitos das teorias científicas ou como *elementos inerentes* à própria ciência, uma vez que um conhecimento bem fundamentado da ciência implica necessariamente um conhecimento da sua história.”

Matthews, neste excerto, realça que um conhecimento bem fundamentado da ciência implica necessariamente um conhecimento da sua história. Apoiados nalguma bibliografia e na nossa própria experiência, estabelecemos o segundo pressuposto do nosso trabalho: a História e Filosofia da Ciência poderá tornar-se num importante instrumento pedagógico, capaz de ajudar a desenvolver um pensamento menos dogmático, onde é exaltado uma das características mais marcantes do pensamento científico – a imaginação. Chegámos aí devido à insatisfação sentida na forma como alguns aspectos são trabalhados nos manuais escolares. A História e Filosofia da Ciência pode ajudar a desenvolver, junto dos jovens, o gosto e o interesse pela ciência. Para isso, deverá ter em conta alguns aspectos que iremos desenvolvendo.

A presente dissertação resultou de um longo processo de investigação que teve início na análise de alguns manuais escolares dos oitavo e nono anos de escolaridade de Ciências Físico-Químicas e com a insatisfação daí decorrente no tratamento de algumas temáticas, nomeadamente, no que diz respeito à ideia de átomo. De entre todas as temáticas que fazem parte dos programas de Ciências Físico-Químicas, correspondentes aos dois ciclos de ensino em que esta disciplina é ministrada (3º ciclo do ensino básico e secundário), a teoria atómica (e os conteúdos que lhe estão directa ou indirectamente associados) é uma das que tem maior transversalidade. Destaque-se também as dificuldades sentidas pelos alunos, nomeadamente os que frequentam níveis de ensino mais básicos, em compreenderem a ideia de átomo. Essas dificuldades advêm, na sua

maioria, da impossibilidade de acedermos directamente ao mundo atómico através dos sentidos (mais concretamente da visão), o que representa um forte obstáculo à sua compreensão (refira-se que ainda nos princípios do século XX, em virtude da falta de uma prova cabal acerca da existência dos átomos, os físicos discutiam se à ideia de átomo correspondia, ou não, uma realidade física).

Estas foram algumas das motivações que nos levaram a escolher a teoria atómica e, obviamente, o seu elemento mais representativo – *o átomo*, como um dos elementos-chave da nossa investigação. Tendo em conta que é nos oitavo e nono anos de escolaridade que este assunto é abordado pela primeira vez (nas unidades – *Reacções Químicas e Classificação dos Materiais*, respectivamente), decidimos dar relevo à análise de alguns manuais destes dois níveis de ensino.

Devido ao elevado nível de abstracção que esta matéria acarreta, é natural que os alunos sintam inevitáveis dificuldades na sua compreensão. Talvez seja por isso que os autores de manuais escolares façam, no início da unidade em que este assunto é abordado, uma pequena incursão histórica.

A convicção, quase imediata, com que ficámos era de que a história apresentada na maioria dos manuais não contribuía para a apropriação de assuntos tão abstractos como a hipótese atómica, pois estava desprovida de valor pedagógico. A história que encontramos em muitos manuais escolares parece ser imune às interrogações e dúvidas com as quais a ciência se foi e vai confrontando. Estamos perante conhecimento autoritário, que não traduz uma actividade de pensamento (no capítulo 3, faremos uma pequena incursão à história apresentada nos manuais escolares).

Como resultado da nossa insatisfação com a utilização de uma História descritiva e pouco estimulante, traçámos o **grande objectivo** do presente trabalho – *criar uma narrativa histórica, alicerçada na utilização pedagógica da História da Ciência, com características diferentes da história apresentada nos manuais escolares e que possa ser utilizada como um complemento à mesma*. Assim, *de modo a promover uma maior aproximação entre o atomismo e os alunos de física*, procurámos elaborar uma narrativa histórica viva, apelativa, que problematize e que realce a importância dos saltos imaginativos nos avanços científicos, ou seja, que reúna todos os ingredientes indispensáveis a dotá-la de valor pedagógico.

A investigação que efectuámos permitiu-nos contribuir para a elaboração de uma narrativa histórica com estas características. Para além disso, conscientes que os desafios que se colocam aos Homens e Mulheres do século XXI passam pela utilização

e domínio das novas tecnologias, desenvolvemos uma aplicação multimédia baseada na história que construímos. Esta aplicação permitirá facilitar a aprendizagem de assuntos relacionados com a hipótese atómica.

1.2. Hans von Baeyer e Rómulo de Carvalho: Uma questão de “ingredientes”

A elaboração de uma narrativa histórica com valor pedagógico apresentou-se-nos como um desafio, que sabíamos de antemão, de elevado grau de dificuldade. Um trabalho deste género e com a abrangência do tema em questão (a teoria atómica) pressupunha uma pesquisa bibliográfica extensa e morosa. Deste modo, foi necessário percorrer um longo caminho, onde procurámos as referências necessárias para construir uma história com o valor pedagógico que pretendíamos. Segundo Whitehead, referenciado por Costa (2005, p.56), a educação deve exibir o valor, o poder e a beleza dos conceitos científicos. Apoiando-nos nas ideias de Whitehead procurámos desenvolver na nossa narrativa histórica conteúdos que satisfizessem essas três categorias. No nosso percurso encontramos duas narrativas históricas que fizeram história para nós:

- *Taming the Atom – the Emergence of the Visible Microworld*, de Hans von Baeyer, publicada pela primeira vez no início da década de noventa do século XX, mais concretamente em 1992;
- *História do Átomo*, de Rómulo de Carvalho, publicada pela primeira vez em 1955, meados do século XX.

Podemos dar a saborear alguns ingredientes a partir de alguns excertos retirados destas obras:

“ ‘I had rather discover one true explanation than be king of Persia,’ the Greek philosopher Democritus once claimed. Today, two and a half millennia after the Persian empire and its Greek adversaries have long since perished, the atomic theory, Democritus greatest creation, reigns as the sovereign paradigm of physical science. No empire can rival this idea in power and longevity. (...) Democritus answered Thales’ question about the nature of matter by introducing a theory of invisible atoms...” (pp.3;5)

Hans von Baeyer

“The two principal building blocks of the atom, the electron and the nucleus, were discovered in England at the turn of the century, in 1897 and 1910 respectively (...). Although the scientists who made these discoveries, Sir Joseph John Thomson and Lord Ernest Rutherford, were lifelong colleagues and friends, their contributions provide a study in contrast. The discovery of the electron in the waning years of the nineteenth century represented the culmination of the methodical electrical researches that began in the eighteenth...” (p.20)

Hans von Baeyer

“Se fosse possível efectuar a divisão até esses extremos, dever-se-ia atingir uma partícula de reduzidíssimas dimensões, que seria indivisível, indestrutível, que seria a menor porção da substância capaz de existir livre. A mínima partícula deram, os gregos, o nome de «átomo», isto é, «sem divisão.»” (p.10)

Rómulo de Carvalho

“Pois embora custe a crer, aliando a delicada técnica à indispensável matemática, foi possível determinar a massa e a velocidade de cada uma dessas pequeníssimas partículas que constituem os raios catódicos. O génio destes famosíssimos trabalhos foi Joseph John Thomson e as conclusões a que chegou foram daquelas que se marcam como um padrão na história da ciência.” (p.122)

Rómulo de Carvalho

Estes extraordinários escritores conseguiram criar narrativas históricas que para além de exibirem o valor, o poder e a beleza de alguns conceitos científicos associados à teoria atómica, são capazes de despertar em quem as lê, o gosto e o entusiasmo pela ciência, em geral, e pela física, em particular. Utilizando uma escrita envolvente, conseguida, em grande parte, graças às questões que levantam e para as quais vão encontrando resposta, os autores conduzem e integram os leitores nas suas aventuras. Toda esta problematização, valorizada com o recurso à História da Ciência, reveste-se de especial importância. Representa o instrumento metodológico que poderá promover, junto dos alunos, a aprendizagem e compreensão de determinados conteúdos científicos.

Tendo em conta o grande objectivo que traçámos, as duas obras referidas são parte do corpus deste trabalho de investigação e são exemplos de narrativas que nos vão ajudar a desenvolver a nossa própria narrativa.

Comparando-as, agora, com as pequenas incursões históricas que constam nos manuais escolares, facilmente constatamos que se verificam diferenças abissais. Cientes de que os objectivos dos autores dos manuais são consideravelmente distintos, certo é que estamos insatisfeitos com a história apresentada na maioria dos mesmos. Nestes não conseguimos perceber onde está a beleza, o valor e o poder das ideias, descurando-se

estes elementos que são o cerne de uma história com valor pedagógico. De um lado a história dos manuais – descritiva, pouco estimulante e sem referência à problemática em questão; por outro as narrativas históricas que mereceram o nosso destaque – vivas, apelativas e que problematizam, ou seja, que exibem o valor, o poder e a beleza dos conceitos científicos, próprios de uma narrativa histórica com valor pedagógico. Nestas podemos-nos apropriar do poder explicativo que determinados conceitos detiveram na compreensão de determinada problemática. A valorização e beleza destes mesmos conceitos advêm da forma como os mesmos são apresentados, realçando que muitos deles, como é o caso do conceito de átomo, resultam de um encontro entre a imaginação e os factos. Assim, utilizando elementos deste tipo, poderemos contribuir para que o conceito de átomo adquira um significado que mais facilmente possa ser compreendido pelos alunos, promovendo nestes o desenvolvimento de saberes verdadeiramente formativos.

A nossa «Aventura do Átomo» nasceu, foi crescendo até que, finalmente, ganhou alma e vida própria. Toda esta evolução nunca teria sido possível sem a substancial influência das referidas obras, cujas marcas são bem evidentes em toda a sua estrutura. Registe-se, agora, o que de mais assinalável lhe foi transmitido por cada uma delas e pelos seus respectivos autores.

Taming the Atom – the Emergence of the Visible Microworld, de Hans von Baeyer

Na nota do editor deste livro pode ler-se o seguinte:

“... Este livro irá deleitar e informar os estudantes ou leigos interessados em ciência, na busca de uma clara e compreensível explicação dos mais básicos níveis da realidade física.”

Sentimos imenso prazer ao ler esta obra (pena é que não esteja traduzida para português). A riqueza intelectual e pedagógica com que Hans von Baeyer brindou a sua obra faz dela, no nosso entender, uma das grandes referências no domínio da divulgação científica. Não admira, portanto, que ficássemos profundamente ligados a *mui* nobre trabalho, onde o conhecimento não se impõe, mas propõe-se a uma relação mais íntima. Servindo-se de um discurso altamente original e, por vezes, metafórico (de acordo com Tobin e Tippins, referenciados por Mellado e al. (2006, p.430), as metáforas podem ser encaradas como uma fonte de reflexão, que possibilitará a germinação de novas ideias e conhecimento), Baeyer introduz as diferentes problemáticas de forma absolutamente

majestosa, impulsionando, deste modo, a *criação de laços* estreitos entre os leitores e a sua obra e entre estes e o conhecimento científico. Vejamos dois exemplos:

“Like hunters in tall grass stalking the same prey from different directions, physicists and chemists attacked the problem of atomic structure in their separate ways.” (p.16)

“The course of acquaintance is slow: only after we became used to a thing can we comprehend it. The little prince understood the value of patience, for on his asteroid there grew a single rose that he had carefully tended and nurtured – that he had tamed.” (p.XX)

O que fez deste livro um marco tão importante para nós e para a história que criámos foi, precisamente, o tempo e atenção que lhe dedicámos (conseguido, obviamente, pela forma rigorosa, interessante e criativa com que foi escrito). Assim, Baeyer conseguiu fazer com que a sua obra se tornasse uma das nossas *rosas* em termos de produção literária:

Como a raposa revelou, na obra de Saint-Exupéry, ao Príncipezinho: “... É o tempo que *perdeste* com a tua rosa que torna a tua rosa tão importante...”.

Baeyer, na sua excepcional criação, faz alusão ao livro de Saint-Exupéry, “O Príncipezinho” e à mensagem associada ao mesmo. De acordo com o autor de *Taming the Atom*, a maravilhosa fábula de Antoine de Saint-Exupéry permite-nos reflectir sobre aquilo a que apelidou de processo de familiarização. Para Baeyer (2000, p. XXI), este processo conduz ao conhecimento, pois só após estarmos familiarizados com uma coisa é que a podemos compreender. A familiarização é um processo longo e moroso, sendo que, durante o mesmo se estabelecem laços profundos, determinantes na compreensão de algo. Na sua aventura o Príncipezinho percebeu o significado de estabelecer laços com alguém. Em termos gerais, compreendeu que o conhecimento que temos do outro será sempre mais profundo e completo se a relação estabelecida for permanentemente alimentada, nutrida e repleta de muita perseverança, paciência e dedicação.

Pretendemos com o nosso trabalho contribuir para a construção de uma história cujo valor pedagógico se traduza na sua capacidade de *criação de laços* com o conhecimento científico e com o mundo físico.

A outra *rosa literária* que nos ajudou a orientar metodologicamente foi escrita por um autor português (e que autor!), que foi professor de Ciências Físico-Químicas

dos ensinos básico e secundário, grande pedagogo (nascido há cem anos, no dia 24 de Novembro de 1906), e profundo conhecedor dos aspectos associados ao processo de ensino-aprendizagem das ciências.

História do Átomo, de Rómulo de Carvalho

“A história do átomo é a história de uma das mais belas vitórias dos homens. Quer-nos até parecer que em todo o desenrolar das actividades humanas nunca a Ciência e a Poesia estiveram ligadas tão intimamente como neste caso.” (p.7)

Rómulo de Carvalho fez divulgação científica de enorme qualidade, quando em Portugal quase não existia divulgação científica. Fiolhais (2005, p.114) refere que, embora as suas aulas, de acordo com antigos alunos, tenham ficado inolvidáveis, os livros aumentaram extraordinariamente o raio de acção do Professor. De entre as suas obras, dedicámos particular atenção a um dos livros da colecção “Ciência para Gente Nova”, cujo nome é *História do Átomo*. Desta colecção, onde Rómulo levanta a ponta do véu do pequeno átomo e do pequeníssimo núcleo, constam também os livros *História da Radiactividade*, *História dos Isótopos* e *História da Energia Nuclear*. Como Fiolhais (2005, p.115) salienta, é notório, logo a partir do título, o valor pedagógico atribuído à história – a ciência é uma construção humana e aprende-se melhor se se conhecer o modo como ela se desenvolve.

Na sequência do que acabámos de referir e à medida que liamos a *História do Átomo*, a nossa atenção foi de imediato captada pelos títulos apelativos de cada capítulo. Exemplos:

“Onde se apresenta Lucrecio, o poeta dos átomos”; “Uma mulher percorre 2000 quilómetros para oferecer à ciência um grande nome”

Aprendemos com Rómulo de Carvalho como um título ajuda a produzir uma tensão que prende, avivando a curiosidade de quem lê e despertando o interesse pela exploração dos capítulos. Ao contrário de outras obras que analisámos (onde, nalguns casos, os títulos também eram bastante apelativos), os leitores não saem defraudados perante tamanho estímulo, pois o desenvolvimento histórico subsequente é ainda mais encantador. A forma simples e clara como Rómulo de Carvalho identifica um problema, promove a sua exploração e consequente resolução, faz da sua escrita um elemento

altamente motivador, capaz de tocar e *nutrir* de forma eficaz o intelecto de qualquer pessoa (desde jovens estudantes, a leigos e especialistas). Fiolhais (2005, p.115) reforça a nossa convicção ao afirmar que a linguagem patente neste livro, apesar de algo clássica, é sugestiva e motivadora, o que só se consegue com uma mistura das artes da retórica e da imaginação, o que não está ao alcance de escritores menores. Por isso, acrescenta Fiolhais, livros como este conservam a frescura inicial e, se o leitor o encontrar numa feira do livro de ocasião, deverá considerar-se feliz por os poder levar consigo para sua leitura privada.

Procurámos dotar a nossa história destes poderosos instrumentos pedagógicos, para que esta consiga (tal como a *História do átomo*, de Rómulo de Carvalho) transmitir aos jovens “respostas a perguntas que eles nunca chegaram a fazer”².

Rómulo de Carvalho também elaborou manuais escolares e, de acordo com Fiolhais (2005, p.117), os que merecem maior destaque são os compêndios *Ciências da Natureza*, que têm capas do conhecido designer Sebastião Rodrigues. Para Fiolhais, o melhor elogio que se pode fazer a estes livros é que por vezes não parecem manuais escolares. Enquanto que noutros manuais de Rómulo de Carvalho a sua prosa mais característica se encontra abafada, aqui ela liberta-se, trazendo para a realidade escolar a curiosidade e a indagação que parecem estar, muitas vezes, afastadas do mundo da escola por motivos difíceis de explicar. Fiolhais vai até mais longe (2005, p.117), salientando que estes compêndios testemunham que há um poeta escondido dentro do professor e, “se o rigor era seu apanágio, ele não aparecia dissociado do encantamento e da sedução que são marcas dos verdadeiros poetas.”

O corpus deste trabalho de investigação são textos. O trabalho sobre estes textos foi moroso e passou por aquilo que Jacques Schlanger chamou co-leitura, contra-leitura e leitura de autor. As considerações que apresentámos resultaram de um intenso processo de co-leitura e contra-leitura. A co-leitura está associada ao trabalho desenvolvido na fase inicial da presente dissertação. Durante este período, efectuámos várias leituras acerca da hipótese atómica, dando especial ênfase à compreensão e interpretação dos conteúdos que iríamos explorar na «Aventura do Átomo». A selecção destes dois livros para o desenvolvimento metodológico é já o reflexo de uma

²De acordo com a edição de dia 20 de Outubro de 2006 do jornal Diário do Sul, numa entrevista ao jornal Público, em Novembro de 1996, Rómulo de Carvalho definiu divulgação científica como a forma de transmitir aos jovens “respostas a perguntas que eles nunca chegaram a fazer”.

contra-leitura onde, de entre a panóplia de livros e textos trabalhados, considerámos que são estes dois que permitem caracterizar aspectos de contextualização histórica com valor pedagógico. A passagem pela coitura e contra-leitura permitiu-nos transitar para uma outra etapa – a leitura de autor. Nesta fase, empregámos as ideias que considerámos mais relevantes de outros textos e obras para elaborar a nossa própria história.

A leitura que efectuámos encaixou-se na categorização estabelecida pelo filósofo Jacques Schlanger que, citado por Valente (1999), descreve essas mesmas categorias do seguinte modo:

[1] como expressão de uma leitura de discípulo que vem completar o texto, uma coitura, uma leitura de obediência na intenção de compreender, de comentar, de interpretar, sem mudar em nada o essencial; [2] ou como expressão de uma leitura crítica, que procura situar-se face ao texto, uma contra-leitura, uma leitura polémica que pretende examinar o texto nas suas primeiras fraquezas; [3] ou ainda como expressão de uma leitura de autor, leitura de usufruto, leitura de bricolage, de homem que faz mel a partir de tudo para seu próprio uso, que emprega as ideias expostas nos textos para produzir as suas próprias obras, e que considera os textos dos seus predecessores como matéria a explorar. (p.103)

Taming the Atom e *História do átomo* são, pelos motivos já destacados, dois bons exemplos de como proporcionar leituras emotivas. Schlanger, citado por Valente (1999), descreve leitura emotiva:

O leitor é envolvido, é tomado pelo texto e reage vivamente a ele – quer se trate de um leitor ingénuo tomado pela beleza do texto, dum leitor apaixonado que o texto prende na sua própria vida, ou de um leitor sábio que vibra com as ideias que exprimem as palavras, leitor que sonha com as ideias que encontra no texto. A leitura emotiva toca tanto a alma como o espírito, tanto em sentimento como a inteligência; prende-nos no interior do texto e absorve-nos nele, num movimento que ultrapassa a semântica e a sintaxe (...) A leitura semântica e a leitura sintaxe colocam-nos frente ao texto, a leitura emotiva retém-nos nele. (p.104)

Foi com o intuito de criar uma história que proporcionasse uma leitura emotiva (a professores, alunos e demais), podendo, inclusive, suscitar uma leitura de autor a alguns (sobretudo professores), que a leitura emotiva sempre nos acompanhou!

1.3. A «Aventura do Átomo»

Pedra Filosofal

Eles não sabem que o sonho
é uma constante da vida
tão concreta e definida
como outra coisa qualquer,
como esta pedra cinzenta
em que me sento e descanso,
como este ribeiro manso
em serenos sobressaltos,
como estes pinheiros altos
que em verde e oiro se agitam,
como estas aves que gritam
em bebedeiras de azul.

eles não sabem que o sonho
é vinho, é espuma, é fermento,
bichinho álaçre e sedento,
de focinho pontiagudo,
que fossa através de tudo
num perpétuo movimento.

Eles não sabem que o sonho
é tela, é cor, é pincel,
base, fuste, capitel,
arco em ogiva, vitral,
pináculo de catedral,
contraponto, sinfonia,
máscara grega, magia,
que é retorta de alquimista,
mapa do mundo distante,
rosa-dos-ventos, Infante,
caravela quinhentista,
que é cabo da Boa Esperança,
ouro, canela, marfim,
florete de espadachim,
bastidor, passo de dança,
Colombina e Arlequim,
passarola voadora,
pára-raios, locomotiva,
barco de proa festiva,
alto-forno, geradora,
cisão do átomo, radar,
ultra-som, televisão,
desembarque em foguetão
na superfície lunar.

Eles não sabem, nem sonham,
que o sonho comanda a vida,
que sempre que um homem sonha
o mundo pula e avança
como bola colorida
entre as mãos de uma criança.

António Gedeão, In Movimento Perpétuo, 1956 ³

³ Poema retirado de: <http://www.citi.pt/cultura/literatura/poesia/antonio%5Fgedeao/>

A narrativa que criámos fala-nos de uma das mais belas vitórias dos homens, a concretização de um sonho, à partida inconcretizável. Mas, foi por muitos acreditarem “que o sonho comanda a vida, que sempre que o Homem sonha, o mundo pula e avança”, que o sonho de Leucipo e Demócrito, o *Átomo*, se tornou “concreto e definido como outra coisa qualquer”.

Efectuar um estudo acerca do desenvolvimento científico da ideia de átomo é sempre uma tarefa árdua, sobretudo devido à transversalidade, dificuldade e premência deste assunto. O átomo está presente nas nossas vidas. Diariamente, somos confrontados com notícias que o envolvem (directa ou indirectamente):

Coreia do Norte ameaça lançar míssil com ogiva nuclear⁴
10.10.2006 - 10h51 Reuters

Um responsável do Governo da Coreia do Norte, citado pela agência sul-coreana Yonhap, afirmou hoje que o regime de Kim Jong-il admite efectuar o lançamento de um míssil com uma ogiva nuclear se os Estados Unidos se recusarem a fazer concessões durante as negociações com Pyongyang.



Figura 2 – A Coreia do Norte efectuou ontem um ensaio nuclear

Energia nuclear: UE vai apoiar Estados-Membros⁵
2006-10-30 17:07

O anúncio foi feito por Durão Barroso que salienta que «o debate sobre energia nuclear na Europa não deve ser um tabu».

A União Europeia vai apoiar os Estados-Membros que recorram à energia nuclear, na área da investigação e da segurança.

Na cultura científica do cidadão o “átomo” deverá ter um lugar importante. Ora, na formação escolar o átomo é apresentado como mais um conceito imposto por uma certa autoridade. Em contraste, a história do átomo está povoada de polémicas e controvérsias até culminar com o reconhecimento de que traduz uma realidade física. É um campo fértil para explorar alguns aspectos da natureza do conhecimento científico (objectivo muito presente na investigação actual no âmbito da educação em ciências). É certo que tudo o que se relaciona com o mundo atómico é de difícil compreensão (especialmente porque não está ao alcance do nosso domínio sensorial), no entanto, não nos podemos resignar e

⁴Notícia retirada de:

<http://www.publico.clix.pt/shownews.asp?id=1272821&idCanal=15>

⁵Notícia retirada de:

<http://www.tvi.iol.pt/informacao/noticia.php?id=737279>

aceitar que essa compreensão esteja apenas ao alcance de uma pequena elite. Compete aos professores de Física a responsabilidade de alterar esta situação, promovendo o estudo desta temática de forma mais aliciante e facilitadora das aprendizagens. O presente estudo procura dar um pequeno contributo nesse sentido. Utilizando elementos da História e Filosofia da Ciência pretendemos, simultaneamente, criar um instrumento ao alcance de professores e alunos, que contribua para o desenvolvimento do interesse pela ciência, e que também facilite a abordagem de assuntos de difícil compreensão, como é o caso da teoria atômica.

De entre a multiplicidade de assuntos relacionados com o atomismo, consideramos de particular importância conhecer o caminho traçado pelo átomo até à sua afirmação enquanto realidade física. Não se pense, contudo, que este caminho foi curto, linear e pacífico, muito pelo contrário! A discussão em torno da existência efectiva dos átomos foi uma das querelas mais longas e aceras de toda a história das ciências. A «Aventura do Átomo» pretende realçar a controvérsia que se gerou em torno desta problemática (mais concretamente, nos finais do século XIX e inícios do século XX) e que acabou por ser resolvida ainda antes do final da primeira década do século XX. A partir daí, o átomo libertou-se, definitivamente, das amarras do imaginário e atravessou a fronteira para o mundo da realidade física, assumindo-se como o cerne da explicação “moderna” do mundo.

Com a presente aventura procuramos transmitir os valores que caracterizam o Príncipezinho, de Saint-Exupéry – persistência, curiosidade, vontade de aprender e de conhecer. A viagem que propomos rumo ao mundo do átomo, que começou por ser imaginário e que está hoje presente em toda a tecnologia, pretende ajudar-nos a criar laços com o mundo físico. Não nos podemos esquecer, para que o átomo se torne especial, é necessário perder tempo a conhecê-lo!

Capítulo 2 – Reflexões sobre a utilização da História da Ciência no ensino e aprendizagem da Ciência

“Changes in education depend on what teachers think and do, something at once so simple and so complex”.

Fullan¹

2.1. O papel do professor no ensino construtivista

Ensinar, especialmente ensinar ciências, é um processo complexo, ao ponto de muitos pensadores o considerarem uma arte. Kubli (2005, p.501) destaca o que acabámos de referir, acrescentando que em todo este processo cabe aos professores a responsabilidade de ensinar as matérias de forma interessante, motivadora e capaz de proporcionar a sua efectiva aprendizagem e compreensão. Nesse sentido, e na busca de estratégias que facilitem o processo cognitivo de aprendizagem, desenvolveram-se várias teorias sobre o ensino-aprendizagem das ciências.

De acordo com o autor supracitado (2005, p.501), a abordagem moderna ao ensino das ciências foi sugerida pelo movimento filosófico conhecido como construtivismo². Matthews, referenciado por Neto (1998, p.149), vai até mais longe, afirmando que a epistemologia construtivista é considerada a epistemologia dominante entre os autores que trabalham no campo da educação em ciências. Segundo Neto

¹ Citado por Mellado et al. (2006, p.420)

² Tendo por objectivo realçar a vertente construtivista do ensino das ciências, considerámos pertinente apresentar, de forma sucinta, algumas das características de outras duas perspectivas de ensino que têm vindo a ser desenvolvidas ao longo dos anos, nomeadamente:

Ensino por transmissão. De acordo com Pérez e Praia, referenciados por Costa (2005, p.13), este tipo de ensino enquadra-se na perspectiva mais tradicional, centrado sobretudo no professor. Os alunos não são levados a construir o conhecimento, pretendendo-se apenas que assimilem os conceitos já elaborados e que o professor apresenta. Deste modo, é ignorado o pressuposto de Ausubel e Piaget (Neto, 1998) de que o conhecimento prévio dos alunos é uma condição *sine qua non* para a aprendizagem de novos conhecimentos, nomeadamente do conhecimento científico.

Ensino por descoberta. Este modo de ensino centra-se na convicção de que o aluno aprende por si mesmo, a partir de descobertas feitas ao acaso. Costa (2005, p.13), apoiando-se nos argumentos de Pérez, acrescenta que a nível da aquisição de conhecimentos, o sucesso não poderia ser o desejado, já que, sem a orientação de um professor, a árdua tarefa de distinguir o que é importante do que é acessório, ou o que é correcto e incorrecto, não seria possível. O conhecimento do modo como a ciência se constrói também ficaria afectado no ensino por descoberta, pois o mesmo não retrata o processo de fazer ciência.

(1998, p.149), esse estatuto é justificado pela sua fácil difusão (devido, em parte, ao carácter apelativo das premissas construtivistas, particularmente pelo que elas representam de contraponto às teses condutivistas, em psicologia, e às teses empiristas, em filosofia). Tal difusão potenciou interpretações e movimentações diversas dando, assim, origem a uma panóplia de variantes (treze, de acordo com a análise de Matthews do construtivismo).

O construtivismo e as opções por algumas das suas variantes encontram-se fundamentados em trabalhos, como os de von Glasersfeld (1987, 1988), cabendo a este o mérito de ter explicado os princípios básicos da corrente construtivista (Neto, 1998, p.150). Assim, de acordo com von Glasersfeld, os dois grandes princípios que constituem o suporte do construtivismo são os seguintes:

1. *o conhecimento não é passivamente recebido, mas activamente construído pelo sujeito cognoscente;*
2. *a cognição desempenha uma função adaptativa, ao serviço da organização do mundo experimental.*

Neto (1998, p.150) salienta que estes pressupostos de partida têm para já importantes *implicações pedagógicas e metodológicas*:

- O interesse do investigador (e, até certo ponto, do educador) deve incidir sobre os mecanismos que ocorrem internamente na mente do aluno, e não exclusivamente sobre as manifestações externas desses mecanismos.
- O conhecimento não pode ser transferido directamente da mente do professor para a do aluno, através da comunicação verbal entre ambos; ao contrário, a comunicação verbal deverá ser encarada como uma ferramenta que ajuda e orienta o processo de construção de conhecimento pelo aluno.
- Aquilo que se aprende numa dada situação depende tanto da situação em si mesma como das estruturas de conhecimento (materiais ou formais) que se possuam (do conhecimento prévio); a aprendizagem formal envolve sempre um aluno aprendiz, construindo o seu conhecimento pessoal (“privado”) de alguma parte do conhecimento científico (“público”).
- O professor deve ter constantemente em vista que os alunos são sujeitos activos, empenhados continuamente em encontrar significado para as estimulações do seu

mundo experiencial, e não meros receptores passivos, simplesmente regulados por essa estimulações.

- Nessa procura activa e motivada de significados interessam, não só as respostas correctas dos alunos, mas também (e, às vezes, sobretudo) os seus “erros” e desvios; como assinala von Glasersfeld, são esses erros e desvios que melhor permitem elucidar o professor sobre os modos próprios que o aluno está a utilizar na sua construção do mundo. Como que se preconiza, assim, uma espécie de “psicologia [ou pedagogia] do erro” que, ao invés de o penalizar, o desmistifica, o valoriza pedagogicamente e o compreende:

Muitas vezes me tenho impressionado com o facto de os professores de ciências, mais ainda, se isso é possível, do que os outros, não compreenderem que não se compreenda. Muitos poucos são aqueles que investigaram a psicologia do erro, da ignorância e da irreflexão. (Bachelard)³

De acordo com Neto (1998, p.152), analisando os dois grandes princípios apresentados por von Glasersfeld e que constituem o suporte do construtivismo, facilmente se conclui que os mesmos podem, na verdade, ser derivados da obra de um grande filósofo de seu nome Kant. Efectivamente, uma das teses nucleares do construtivismo, a de que o sujeito é o responsável (em última análise, o principal responsável) pelo seu próprio conhecimento, é, em simultâneo, uma assunção central da filosofia kantiana. O que Kant classifica como a sua “revolução copernicana” constitui, justamente, uma mudança radical no papel que é conferido ao sujeito no processo de conhecer – o sujeito passa de espectador mais ou menos passivo, a actor e protagonista. Neto (1998), a partir de um excerto do próprio Kant (1989), elucida-nos até que ponto essa mudança foi, de facto, radical e decisiva em termos de conhecimento:

Não podendo [Copérnico] prosseguir na explicação dos movimentos celestes enquanto admitia que toda a multidão de estrelas se movia em torno do espectador, tentou [ver] se não daria melhor resultado fazer antes girar o espectador e deixar os astros imóveis. Ora, na metafísica, pode-se tentar o mesmo, no que diz respeito à intuição dos objectos. Se a intuição tivesse de se guiar pela natureza dos objectos, não vejo como deles se poderia conhecer algo a priori; se, pelo contrário, o objecto (enquanto objecto dos sentidos) se guiar pela natureza da nossa faculdade de intuição, posso perfeitamente representar essa possibilidade. (p.152)

³ Citado por Neto (1998, p.151)

Na prática, este excerto traduz a viragem epistemológica (e psicológica) fundamental imprimida por Kant: o *locus* de controlo da construção do conhecimento é transferido do domínio do objecto para o campo de acção do sujeito. Compete ao sujeito regular o conhecimento dos objectos e não os objectos a imporem o “seu” conhecimento ao sujeito. Desta forma, a filosofia kantiana é nitidamente uma filosofia construtivista, assumindo-se, inclusive, como uma referência fundamental.

Neto (1998, p.153) afirma que os pressupostos da psicologia construtivista (ou, de uma forma mais precisa, das psicologias construtivistas) são, no essencial, e com as devidas adaptações, os que subjazem à filosofia construtivista kantiana. De acordo com Neto, foi assim que Piaget (primeiro psicólogo a utilizar de forma consistente a noção de construção cognitiva), partindo de uma posição assumidamente kantiana, se propôs analisar os mecanismos através dos quais o ser humano, tendo acesso apenas aos dados da sensibilidade e às suas representações e estruturas mentais prévias, consegue construir um mundo experiencial (ou seja, subjectivo) relativamente estável e coerente.

Para além de Piaget, Ausubel também é um nome de referência no domínio da psicologia construtivista. Apesar dos modelos defendidos por estes autores registarem algumas diferenças⁴, importa salientar que em ambos está implícita a ideia – levada à sua essência pura nos conceitos à priori de Kant – de que o conhecimento prévio é uma condição *sine qua non* para a aprendizagem e construção de novos conhecimentos, nomeadamente o conhecimento científico.

Outro dos grandes vultos da psicologia construtivista (cuja obra só recentemente foi descoberta pelo mundo ocidental) é o russo Vygotsky. O rótulo de construtivista que lhe foi atribuído deve-se, sobretudo, ao facto de uma das máximas do construtivismo, o papel activo do sujeito na construção do seu conhecimento, estar presente na formulação vygotskiana. Tal como Piaget e Ausubel, Vygotsky também destaca o papel

⁴De acordo com Neto (1998, pp.155 - 156), o construtivismo piagetiano é de natureza essencialmente formal. É uma epistemologia preferencialmente virada para os aspectos gerais da construção cognitiva (para as estruturas e operações de pensamento) e, ao contrário de Ausubel, não tanto direccionada para os aspectos específicos (conteúdos do pensamento). Como pré-requisito para a construção do conhecimento, os dois autores posicionam-se em pontos de partida distintos:

- Piaget estabelece como *factor determinante* no processo de aprendizagem e construção de novos conhecimentos o *nível de desenvolvimento cognitivo* atingido pelo sujeito: os seus esquemas e operações lógicas, aplicáveis a qualquer conteúdo.
- Ausubel, ao contrário, postula como *factor decisivo* o papel das *estruturas cognitivas*, isto é, a organização lógica dos conteúdos específicos e a natureza desses mesmos conteúdos.

do conhecimento prévio na construção do novo conhecimento. Neto (1998, p.157) afirma que para Vygotsky é útil diferenciar *duas formas distintas do conhecimento prévio* de um aluno. A elas correspondem *duas categorias de conceitos*:

1. os conceitos que o aluno assimila naturalmente, através da sua interacção com o meio – *conceitos espontâneos*;
2. os conceitos que o mesmo aluno adquire de uma maneira formal e sistemática, geralmente através da intervenção da escola – *conceitos científicos*.

Vygotsky chegou a esta classificação como resultado do estudo aprofundado da psicogênese dos conceitos espontâneos e dos conceitos científicos. Concluiu que ambos experimentam um longo e complexo processo de desenvolvimento, não sendo, por isso, assimilados numa forma definitiva e acabada – têm uma “história interior” ao indivíduo.

O pensamento de Vygotsky enquadra-se perfeitamente na matriz construtivista, na medida em que destaca o papel do conhecimento prévio na construção do novo conhecimento, conjugando as duas componentes do conhecimento e colocando-os em interacção. Analisando, por exemplo, a forma como Vygotsky se refere às transformações que ocorrem por volta da adolescência, chegamos a uma conclusão nesse sentido. Segundo este autor, nesta fase de mudanças profundas (que se referem quer ao início do desenvolvimento de “processos psicológicos superiores”, nos quais se inclui o controlo metacognitivo; quer ao início da fase de consolidação dos “verdadeiros conceitos”, os conceitos científicos), as estruturas que se formam não são, na sua essência, funcionalmente diferentes das estruturas pré-existentes. São, antes, resultando da incorporação destas numa nova síntese, numa nova estrutura. Significa isto que, tal como Neto (1998, p.158) destaca, à semelhança do que acontecia com o construtivismo piagetiano, também em Vygotsky “o superante integra sempre o superado e nele se apoia”.

Tal como foi referido anteriormente, na adolescência ocorrem transformações profundas, no entanto, estas só poderão ocorrer se alguns requisitos forem cumpridos. A mais importante tem, para Vygotsky, uma cariz social e cultural. Contrariamente a Piaget, que concebia o desenvolvimento cognitivo e a aprendizagem como processos autónomos, sem interacção mútua significativa, Vygotsky toma partido de uma posição radicalmente diferente. Via a aprendizagem, em particular a aprendizagem escolar,

como decisiva para o desenvolvimento. Defendia que, para haver desenvolvimento, “o ensino que a escola proporciona deve preceder esse desenvolvimento, funcionando como seu estimulador, seu motor e condutor. E o ensino que a escola proporciona, bem como toda a educação em geral pressupõem, na concepção de Vygotsky, o diálogo e a cooperação da criança com os outros; pressupõem, no fundo, interação social. É essa interação social que possibilita à criança o verdadeiro desenvolvimento, que lhe permite ser amanhã mais competente e autónoma do que é hoje” (Neto, 1998, pp.158-159). Para Vygotsky, o desenvolvimento cognitivo é paralelo ao desenvolvimento da linguagem, ao desenvolvimento social e até mesmo ao desenvolvimento físico, porque todos estes domínios têm lugar num contexto social e cultural que não pode ser ignorado.

Refira-se que um dos aspectos mais marcantes da conceptualização de Vygotsky sobre o desenvolvimento do adolescente direcciona-se, fundamentalmente, para o futuro sem, contudo, deixar de se apoiar no presente, e sem negar a influência determinante do passado, ou seja, da herança histórico-cultural da sociedade em que o indivíduo está inserido. De acordo com Neto (1998, p.117), esta abordagem prospectiva encontra-se representada na noção vygotskiana de *Zona de Desenvolvimento Próximo*. Vygotsky considerava a existência, na mente dos aprendizes, de uma *Zona de Desenvolvimento Próximo* (ZDP), que representa a diferença entre o que o aprendiz pode fazer individualmente e aquilo que é capaz de atingir com a ajuda de pessoas mais experimentadas, como o professor, ou em colaboração com outros colegas mais aptos na matéria. Bruner, referenciado por Neto, entende que a ZDP corresponde ao modo como a criança é capaz de alcançar a sua competência intelectual. Por outras palavras, aquilo que a criança é capaz de realizar hoje em colaboração com os adultos, podê-lo-á potencialmente realizar sozinha amanhã.

A teoria da zona do desenvolvimento próximo protagonizada por Vygotsky é de importância fundamental, pois implica mudanças decisivas na forma como se concebe a relação entre o desenvolvimento e a aprendizagem, sobretudo em idade escolar. Ao contrário do ensino tradicional (orientado para um estado de desenvolvimento já atingido, sem condições de conduzir e estimular os alunos) a perspectiva de Vygotsky tem subjacente um princípio didáctico oposto – o ensino deve ser orientado para o futuro e não para o passado.

No que respeita ao papel dos outros no desenvolvimento da criança, as perspectivas de Piaget e Vygotsky divergem.

Para Piaget, e ainda segundo Neto (1998, p.119) o processo de desenvolvimento estaria subjacente a uma espécie de “monólogo”, realizado por uma “criança solitária”, entregue às suas próprias reflexões sobre as acções que vai executando. Dizendo de outra forma, a tarefa da criança consiste em construir uma representação do mundo físico, conseguindo-o graças a algumas estruturas cognitivas que subjazem ao seu pensamento, mais do que à comunicação com os outros. Com efeito, a teoria de Piaget é particularmente omissa relativamente ao papel do professor. Deste modo, e como salienta Neto (1998, p.119), parece legítimo inferir que ao professor “estaria reservada a missão de proporcionar ao aluno os materiais e as experiências necessárias para ele próprio realizar o seu desenvolvimento”.

Antagonicamente, Vygotsky faz ressaltar a “imagem de uma criança não solitária, mas em cooperação e “diálogo” com os outros” (Neto, 1998, p.118). Para este, a escolarização exige a continuação do diálogo que o desenvolvimento implica, desempenhando o professor um papel crucial. Constituem-se como pontos nucleares da sua teoria um comportamento consciente e auto-regulado do professor e a sua capacidade de fazer com que os alunos interiorizem esse tipo de comportamento como suporte da construção do conhecimento e das competências. Desse modo, e de acordo com a teoria vygostskiana, a escola, em geral, e o professor, em particular, são absolutamente essenciais para o aluno desenvolver “processos psicológicos superiores”.

O papel menos decisivo que Piaget atribui à comunicação da criança com os outros, particularmente com o professor, está implícito na diferenciação que o autor estabelece entre desenvolvimento e aprendizagem. Digamos que para Piaget é o desenvolvimento que precede a aprendizagem. Por sua vez, para Vygotsky a aprendizagem precede o desenvolvimento, cabendo à escola e ao professor, como finalidade educativa superior, “o desenvolvimento do pensamento reflexivo e auto-regulativo dos alunos, ou seja, a sua metacognição” (Neto, 1998, p.119).

E de que *instrumentos* se devem munir os professores de ciências para alcançar esta finalidade educativa superior? Pedrinaci (1996) aponta a História da Ciência como um recurso didáctico de primeira magnitude:

A história da ciência é (...) um recurso didáctico de primeira magnitude. Que melhor forma haverá de entender como se constrói a ciência do que analisar alguns casos históricos da gestação das teorias? Que melhor forma haverá de valorizar o que são e significam as teorias do que analisar algumas controvérsias históricas ou reflectir sobre a potencialidade explicativa que oferecem diversas teorias que

afectam um mesmo campo do saber? Que melhor forma haverá de evitar uma visão dogmática e acabada da ciência do que analisar como se vão substituindo umas teorias às outras, como todas as explicações são efémeras? (...) A Epistemologia e a história da ciência, (...) ajudam-nos a decidir quais os conteúdos que convém trabalhar e em que ordem, ou a prever algumas das dificuldades ou obstáculos que encontram os nossos alunos e alunas, ao mesmo tempo que podem orientar acerca do modo de superar tais dificuldades. (pp. 4, 5)

Outro dos autores que destaca a importância da História da Ciência, mais concretamente da História e Filosofia da Ciência, no ensino das ciências é Matthews. No seu livro “Science Teaching – The role of History and Philosophy of Science”, Matthews exemplifica, recorrendo ao caso do movimento do pêndulo, como a História e Filosofia da Ciência pode contribuir para a melhorar a rotineira educação científica. Para este é claro que uma ciência “contextualizada”, onde se destaque o esforço levado a cabo por grandes mentes e se apresentem os seus cativantes debates, pode proporcionar uma abordagem histórica interessante a assuntos de elevada complexidade. Assim, de acordo com Matthews (1994, p.135), uma contextualização científica deste tipo representa uma magnífica oportunidade para melhorar a compreensão que os alunos têm da ciência e da natureza do conhecimento científico.

Tendo em conta tudo aquilo que abordámos, consideramos que a História e Filosofia da Ciência pode constituir-se como elemento importante na formação de um professor construtivista. Nomeadamente, desenvolve sensibilidade para outras formas de pensamento, ajudando a dar importância às concepções dos alunos. Ajuda-os, também, a tomar consciência das dificuldades e impossibilidades associadas à mudança conceptual. Tendo em conta a realidade escolar, é para nós, professores de física, difícil desenvolver todo o trabalho necessário para efectivamente colocar em prática a perspectiva construtivista. Uma das dificuldades prende-se, como salienta Isquierdo (1996, p.7), com o tempo que é concedido aos professores para investigação. Na sua opinião, e na nossa, deveria ser dado mais tempo para investigação aos professores, para que estes possam adquirir mais valias para a sua prática pedagógica. Se assim fosse, os professores poderiam elevar a sua formação científica, bem como a dos seus alunos.

Apesar deste enorme obstáculo, a falta de tempo concedida aos professores para investigação, consideramos que uma via importante da formação de um docente de ciências, e em particular de física, será o desenvolvimento de uma cultura no âmbito da História da Ciência. Claro que também por aí é necessário muito tempo e oportunidades de investigação.

Qualquer professor, e a sociedade em geral, tem a noção que os alunos têm muitas dificuldades em incorporar o conhecimento científico, uma vez que as ideias do senso comum estão profundamente enraizadas nas suas crenças e ideias. Um professor/educador terá de ser alguém consciente de que na sala de aula coexistem e se defrontam dois códigos de linguagem distintos:

- o do professor, mais rico, mais estruturado, mais rigoroso e mais abstracto;
- o do aluno, menos estruturado, menos consciente e mais apegado ao senso comum.

A linguagem matemática é o mais rigoroso veículo para expor e discutir as ideias científicas e para a criação de conhecimento nas mãos dos cientistas. No entanto, devido ao elevado nível de abstracção necessário para compreender as teorias e conceitos físico-químicos, aquilo que pode ser de fácil compreensão para o professor, poderá não o ser para os alunos. Com isto relaciona-se o chamado conhecimento tácito do professor, que origina falhas de comunicação na sala de aula. Possuir conhecimento tácito é ser capaz de lidar com uma dada situação sem, no entanto, conseguir descrever e comunicar esse conhecimento em pormenor (Neto, 2003). Estes problemas prendem-se muitas vezes com o facto de o professor já ser possuidor de uma linguagem científica assente em estruturas lógicas de pensamento que lhe permitem aceder ao conhecimento científico mais abstracto. Como refere Anderson, citado por Neto (2003), grande parte do conhecimento processual do professor é tácito e automatizado, queimando etapas e omitindo transformações imprescindíveis para a compreensão dos alunos. O professor deve então tentar eliminar ao máximo o conhecimento tácito, não esquecendo que terá de fazer algumas adaptações, nomeadamente no domínio da linguagem, tendo em conta a faixa etária com que trabalha.

A linguagem científica utilizada pelo professor, na maioria das vezes, não estabelece na mente dos alunos ligações com a linguagem do quotidiano, ocorrendo o que Ausubel chamou de *aprendizagem mecânica* (“rote learning”). Esta é a aprendizagem que ocorre quando as novas informações são aprendidas sem interagirem com conceitos relevantes existentes na estrutura cognitiva. Assim, e partindo da perspectiva defendida por Vygotsky, cabe ao professor ajudar o aluno a transformar os conhecimentos do senso comum em conhecimentos mais válidos e mais próximos dos cientificamente correctos, onde ele terá obrigatoriamente que usar uma linguagem de índole científica.

Qualquer professor deverá ter em conta os diferentes estilos de cognição, de aprendizagem e de motivação dos seus alunos, condições essenciais para que estes desenvolvam saberes verdadeiramente formativos. Também neste campo a História e Filosofia da Ciência pode ajudar o professor e, por vezes, os alunos.

2.2. Contributos da História e Filosofia da Ciência para o ensino das Ciências

“Muitos estudantes imaginativos e inteligentes ter-se-ão, no passado, afastado da ciência, e particularmente da física, porque o material que lhes era apresentado não lhes agradava ou não tinha qualquer interesse humano.”

Woodall⁵

“A ciência é uma maneira de pensar, muito mais que um corpo de factos.”

Carl Sagan⁶

No subcapítulo anterior tecemos breves considerações acerca do papel que poderá desenvolver a História e Filosofia da Ciência no âmbito do ensino construtivista das ciências. Neste ponto, reforçaremos as convicções defendidas, salientando, de uma forma mais abrangente, as vantagens da utilização desta área disciplinar no ensino das ciências e, em particular, da Física. Sempre que oportuno, ilustraremos essas vantagens com alusões à nossa problemática e à «Aventura do Átomo».

A História da Ciência é um campo do saber que atrai estudiosos de muitas áreas, alguns deles – como nós – vindos do ensino da física e tendo apenas um modesto conhecimento de história e filosofia. Como já referimos, os escritos sobre educação científica apontam para a necessidade de introduzir elementos que ajudem a explorar alguns aspectos da natureza da ciência, havendo autores que defendem que através da História e Filosofia da Ciência se poderá proporcionar esses elementos (Matthews, etc.). O nosso interesse pelo átomo e o confronto com as incursões históricas dos manuais escolares (pouco estimulantes, mostraremos mais adiante) e o pressuposto de que a História da Ciência pode ser um instrumento importante no desenvolvimento de alguns conceitos, nomeadamente, daqueles que dizem respeito ao mundo “invisível”.

De acordo com Kragh (2001, p.37), a evolução da História da Ciência durante as décadas de 40 a 80 do século XX caracterizou-se por uma proliferação de métodos e perspectivas, mais do que pelo emergir de um consenso quanto ao que constitui precisamente esta disciplina. O eclectismo e o facto de a disciplina incluir interesses isolados, em parte em conflito, fez com que se tornasse problemático reflectir acerca da finalidade da utilização da História da Ciência em contextos educativos. Não obstante, muitos procuraram especificar qual deveria ser a finalidade superior da disciplina. De entre os pontos de vista frequentemente expressos, destaquemos o de Duhem, para quem, assim o refere Kragh (2001, p.41), a História da Ciência pode ter uma importante função didáctica na demonstração da verdadeira natureza do conhecimento científico. Entre os argumentos a favor de um ensino da ciência orientado historicamente está também, de acordo com Kragh, o de Woodall (um dos autores citados no início deste subcapítulo). Este argumentava que o uso da história se justifica pela alegada capacidade para apresentar as ciências de modo “mais suave”, tornando-as mais atraentes numa altura em que são encaradas com suspeita por muitos jovens. Como salienta Kragh, a História da Ciência pode desempenhar um papel positivo no ensino, contribuindo para uma concepção menos dogmática da ciência e dos métodos científicos, agindo como um antídoto relativamente a um entusiasmo sem sentido crítico pela ciência.

Vários são os autores, como Matthews e Ana Luísa Janeira, para quem a ideia primitiva de uma História da Ciência, estabelecida sobre um tempo linear e homogéneo, e sustentada por uma racionalidade triunfalista, não é suficiente para melhorar a compreensão que os alunos têm da ciência e da natureza do conhecimento científico. A esta deverá estar associada a Filosofia da Ciência. Em relação a este aspecto Kragh (2001) acrescenta o seguinte:

Quanto às funções que a história da ciência pode desempenhar para a filosofia, existem, em termos gerais, dois tipos. O filósofo pode utilizar indutivamente a história da ciência, de tal modo que, a partir do seu conhecimento do modo como pensaram e agiram cientistas eminentes, generalize essas experiências históricas sob a forma de doutrinas filosóficas. (...) Ora, em contrapartida, as doutrinas

⁵ Citado por Kragh (2001, p.42)

⁶ Citado por Joe Schwartz em <http://www.geocities.com/quackwatch/ciencia.html>

filosóficas podem ser verificadas pela comparação com dados da história da ciência. Assim, a história da ciência acaba por funcionar como fonte de inspiração ou como instrumento de controlo. Nos últimos anos, as ligações entre filosofia da ciência e história da ciência têm vindo regularmente a fortalecer-se e não há dúvida de que a história desempenha, de facto, um importante papel filosófico (pp.40, 41)

Nos últimos anos, as ligações entre Filosofia da Ciência e História da Ciência têm vindo regularmente a fortalecer-se, particularmente, no campo do ensino das ciências. Janeira (1985, p.283) afirma que hoje em dia, na brecha e no efeito de um novo pensar sobre o conhecimento científico, a História da Ciência é percorrida pela interrogação sobre os fundamentos e privilegia descrições sobre os processos de produção e de reprodução nas ciências.

Segundo Mellado et al. (2006, p.420), até aos anos 80 do século XX, a Filosofia da Ciência esteve praticamente ausente dos programas de ciências destinados ao ensino, bem como dos planos de formação de professores. De acordo com Matthews, referenciado por Mellado et al. (2006, p.420), a partir de então, muitos trabalhos começaram a defender que era indispensável incluir alguma reflexão acerca da natureza da ciência nos domínios supracitados. Matthews (1994, p.108) sugere que aspectos da interconexão entre ciência e filosofia devem ser introduzidos aos estudantes nas aulas de ciências. Este procedimento faz parte da aprendizagem acerca da natureza da ciência, representando, para este autor, uma oportunidade não só para aprender filosofia, como também, para *fazer* filosofia. Matthews refere que a filosofia começa com questões tais como “O que quer dizer com?” e “Como é que sabe?”, que os estudantes podem fazer em qualquer nível da sua educação em ciências. Tais questões conduzem os estudantes, naturalmente, para dentro da esfera da lógica e da apreciação de argumentos, funcionando também como bons indicadores para os professores dos alunos cujo pensamento *naïf* ainda necessita de ser mais treinado e informado. Tseitlin e Galili (2006, p.393) são outros dos muitos autores que defendem a utilização da Filosofia da Ciência no ensino das ciências. Para estes, esta abordagem é essencial pois permite incluir a reflexão científica, indispensável à compreensão da natureza da ciência.

A necessidade de explorar com os alunos alguns aspectos relacionados com a natureza da ciência está a sensibilizar os responsáveis pela elaboração dos currículos e algo parece estar a mudar. Na opinião de Pedrinaci (1996):

As reformas educativas levadas a cabo nas últimas décadas nos países ocidentais têm incorporado no currículo da educação científica aspectos relacionados com o conhecimento da natureza

da ciência. A origem desta tendência vem da contestação de que os estudantes têm uma visão dogmática e estereotipada da ciência e dos cientistas, assim como da ideia de que conhecer as ciências mesmo nos níveis mais básicos, deve implicar ter algumas noções acerca do modo como os cientistas geraram as teorias, das limitações que estas possuem ou da inevitável influência social que afecta o processo da construção científica (...) também influenciou o convencimento de que a aprendizagem científica deve conter valores educativos, éticos e humanos que vão além do conhecimento humano da produção científica. (p.4)

Caamaño (1996) refere que a exploração de questões relacionadas com a construção da ciência já faz parte, desde 1989, dos planos curriculares de países como Inglaterra, Gales e Irlanda do Norte. Nestes planos curriculares são expostos os objectivos relacionados com a natureza do conhecimento científico, de acordo com os quais “os estudantes têm que desenvolver um conhecimento e uma compreensão das formas em que as ideias científicas mudam ao longo do tempo e de como a natureza destas ideias e a sua utilização vem condicionada pelos contextos culturais, éticos e sociais nos quais se desenvolvem” (Caamaño 1996, p.44).

Para Caamaño (1996, p.47), a reflexão acerca da natureza do conhecimento científico possibilita os alunos de:

- Estudar as ideias e as teorias utilizadas noutras épocas para explicar os fenómenos naturais;
- Valorizar a evidência experimental de que se dispõe, relativa a estas ideias e teorias;
- Dar-se conta de como se relaciona o desenvolvimento de um conceito científico ou teoria com o contexto histórico e cultural da época em que surge;
- Estudar exemplos de controvérsias científicas e a forma como estas ajudaram ao progresso científico;
- Relacionar as ideias e teorias científicas de outras épocas com o conhecimento científico e tecnológico actuais (...)

É fulcral incluir reflexões acerca da natureza do conhecimento científico nos currículos, uma vez que, como demonstra a seguinte passagem de Carvalho e Vannucchi (2000), os alunos revelam lacunas em determinadas competências que deveriam ser essenciais.

Os estudantes não estão preparados para examinar factos segundo diferentes pontos de vista; não estão prevenidos para a provável diversidade de opiniões; não questionam o propósito da investigação científica; não são levados a comparar os seus pontos de vista com os dos outros estudantes (...) (p.428)

Vários são os autores que demonstram preocupação pela não inclusão da História e Filosofia da Ciência no ensino das ciências. Carvalho e Vannucchi (2000) são apenas exemplo disso:

Ignorando os aspectos históricos e filosóficos da ciência, geramos uma visão pré-conceituada da actividade científica; uma visão baseada em conceitos empírico-indutivos – uma ciência sendo composta por verdades inquestionáveis. Esta postura rígida e intolerante nega, ou pelo menos subestima, a criatividade inerente ao trabalho científico, criando obstáculos invencíveis ao ensino da ciência (p.428).

Em suma, no ensino das ciências, considerações históricas e filosóficas são obviamente úteis (Matthews, 1994, p.109).

De acordo com Janeira (1985, pp. 281-282), o reconhecimento da História e Filosofia da Ciência e o papel atribuído à sua função formativa pressupõem o interesse que têm o passado efectivo e a logicidade das ciências para a formulação teórica e para a prática científica do presente. Apesar de incluir duas disciplinas distintas, ambas contribuem, a seu modo, para tornar mais inteligível o mundo científico. Janeira (1993, p.4) refere que à História atribui-se-lhe a tarefa de temporalizar os caminhos trilhados pelo conhecimento desde a forma como ocorreu a percepção inicial dos fenómenos naturais até à definição dos factos científicos, passando pelos métodos intermediários e pelas técnicas em jogos. No que diz respeito à Filosofia, deve intervir, retirando das suas diferentes disciplinas um espólio crítico e instrumentos de análise, destinados a clarificar os fundamentos primeiros e a pertinência interna de hipóteses de trabalho, raciocínio, erros, leis ou argumentos.

A História e Filosofia da Ciência exige, assim o afirma Janeira (1985, p. 282), que se questione sem temor os conceitos de objectividade e neutralidade, perspectivando-os pelos seus contornos englobantes, visão do mundo ou ideologia. É também de extrema utilidade para qualquer inserção consciente e responsável na realidade sócio-cultural.

No que diz respeito a esta última vertente, muitos são os que defendem a utilização da História e Filosofia da Ciência no ensino como elemento essencial para proporcionar uma educação unificadora dos mundos científico, cultural e social. Wang e

Marsh (2002, p.171) consideram que esta área disciplinar assenta na relação entre ciência e sociedade, transmitindo aos estudantes muito mais do que o mero conhecimento académico. Quando se conta uma história, não podem falhar detalhes da sua contextualização histórica, social e cultural. Uma narrativa que retrate a evolução de determinado assunto científico deve conter certos pormenores representativos da situação social e cultural da época. Para além de serem *peças* importantes na compreensão das motivações que levaram cientistas a enveredar por um determinado estudo, permitem também atestar o impacto que certas teorias exerceram sobre a sociedade e a cultura em geral. A narrativa, por nós desenvolvida, tentará mostrar como os artigos de Einstein, publicados em 1905, tiveram efeito na sociedade e na arte, e autores há (Miller, 2001), que nos ajudam a ver como a cultura da época terá tido efeitos na produção científica de Einstein.

Koumaras e Seroglou (2001, p.155) defendem que a utilização da História e Filosofia da Ciência no ensino da Física permite cumprir os três domínios considerados imprescindíveis à aprendizagem desta disciplina. Estes domínios são os seguintes:

- cognitivo;
- metacognitivo;
- emocional (ou afectivo).

O primeiro domínio, de acordo com os autores mencionados, é referente ao ensino e aprendizagem dos conteúdos de Física, à perícia de resolução de problemas e às ideias alternativas dos alunos (2001, p.155). Neste âmbito, a apresentação de casos históricos na sala de aula pode ser bastante benéfico. De acordo com Wang e Marsh (2002, p.174), o contacto com a história permite revelar como uma nova ideia substitui uma antiga e como as duas ideias podem entrar em conflito.

Numa outra perspectiva da vertente cognitiva, a História da Ciência parece ser um veículo importante na aproximação dos professores às ideias dos alunos. Para Griffiths & Barry, citados por Wang e Marsh (2002, p.176), uma abordagem histórica da ciência permite que os estudantes sejam capazes de reconhecer os seus próprios mal-entendidos conceptuais. A título de exemplo refira-se a dificuldade que os alunos sentem para compreender a ideia de átomo e aceitá-lo enquanto entidade real. Longe do alcance dos seus sentidos, o mundo dos átomos e das moléculas parece propício a mal-entendidos conceptuais. Através da narrativa que criámos tentámos mostrar como foi necessário percorrer um longo caminho, travar várias batalhas, para que finalmente o átomo emergisse da hipótese para a realidade. Vários foram os cientistas que duvidaram

da sua existência efectiva e que mais tarde acabaram por se render. Ostwald foi um dos que se converteu ao atomismo após a explicação do movimento browniano protagonizada por Einstein.

De acordo com Koumaras e Seroglou (2001, p.156), no domínio metacognitivo, o recurso à História e Filosofia da Ciência permite uma aproximação ao modo como determinado conceito científico é construído, ou seja, à sua natureza. O ensino baseado neste poderoso instrumento pedagógico promove a familiarização dos alunos com o conhecimento científico, uma vez que permite aceder aos factores que inspiraram ou motivaram determinado cientista durante a sua investigação. Como exemplo, refira-se a influência que teve o monumental trabalho teórico desenvolvido por Einstein acerca do movimento browniano, na demonstração experimental da realidade dos átomos protagonizada por Perrin em 1908.

O domínio metacognitivo também está relacionado com as inter-ligações entre a ciência e a sociedade (Koumaras e Seroglou, 2001, p.156). Wang e Marsh (2002, p.173) salientam, como aliás já foi referido, que a História da Ciência é o meio mais adequado para ilustrar as relações entre ciência e a sociedade.

A dimensão emocional (ou afectiva) constitui-se como o terceiro domínio, onde se incluem os esforços dos investigadores no Ensino da Física, no sentido de criarem e utilizarem métodos que contribuam para motivar os alunos a estudar esta disciplina. Mais uma vez a História e Filosofia da Ciência aparece como contributo importante para mudar a atitude dos estudantes face ao estudo da Física. O grande trunfo desta área aplicada ao ensino parece ser a apresentação da Física como uma actividade humana e não apenas como um conjunto de conteúdos. A este propósito Matthews, citado por Wang e Marsh (2002, p.178), afirma que “a História, examinando a vida e a época dos cientistas, humaniza os assuntos da ciência, tornando-a menos abstracta e mais atractiva para os alunos”. De acordo com Heilborn (1994, p.13), a História da Ciência pode contribuir para a abertura a uma nova visão sobre os cientistas e sobre as dificuldades inerentes ao desenvolvimento dos seus trabalhos. Explorando as motivações pessoais que levaram os cientistas a enveredar por determinado caminho e a tomar determinadas decisões, realçando as vicissitudes inerentes aos seus trabalhos, apresentando as relações entre alguns deles, ou até mesmo, revelando pequenas curiosidades acerca das suas personalidades, possibilitará derrotar a imagem estereotipada que deles se tem. A aproximação entre os grandes cientistas, os chamados “génios”, e o comum dos mortais, contribui para uma maior motivação face ao estudo da ciência. Tal como afirmam Wang

e Marsh (2002, p. 177), a abordagem histórica da ciência permite não só estimular os interesses dos alunos e atitudes positivas em relação à ciência, como também e no final, unir o fosso entre cientistas e não-cientistas. A utilização da História da Ciência no ensino permite apresentar a ciência como uma construção humana, colectiva, fruto do trabalho de muitas pessoas, transmitindo a mensagem aos alunos de que a ciência não é mais do que o resultado do esforço de pessoas como eles próprios.

Matthews (1994) resume os benefícios do uso da História e Filosofia da Ciência no ensino através da lista que se segue, considerando que a sua utilização ajuda a:

- Entender melhor os conceitos científicos e os métodos;
- Relacionar o desenvolvimento do pensamento individual com o desenvolvimento das ideias científicas;
- Compreender a natureza da ciência;
- Impedir o cientismo e o dogmatismo (comum na educação científica);
- Humanizar os conteúdos científicos, reduzindo os formalismos (...);
- Entender que «a ciência é falível e não fornece verdades absolutas»;
- As teorias podem ser entendidas se o seu desenvolvimento histórico for entendido.

Infelizmente, como muito bem assinala Popper, citado por Neto (2003, p.2), “o facto é que a nossa pedagogia consiste em sobrecarregar as crianças com respostas, sem que elas tenham colocado questões, e às perguntas que fazem não se presta atenção”. Neto (2003) refere que para Popper *Respostas sem perguntas e perguntas sem respostas* é uma conduta pedagógica suportada pelo que designa de *teoria da cuba* do espírito humano. De acordo com Popper, citado por Neto (2003):

A nossa cabeça é uma cuba. Tem orifícios e, através desses orifícios, a informação sobre o mundo flui para dentro dela. Esta é igualmente a teoria básica da pedagogia [habitual]. (...) A cuba tem ainda um funil que lhe é colocado, e pelo qual lhe é vazado o saber. É esta a teoria comum. (K. Popper)

Entre aquilo que é reclamado à escola, no sentido de actualizar e ampliar o potencial cognitivo dos alunos e aquilo que é suposto a escola estar a conseguir realizar, parece existir um grande fosso. A diminuição desse fosso passa necessariamente pelo assegurar de novas formas de actuação pedagógica e didáctica como a História e Filosofia da Ciência que, ao invés de contribuírem para encherem a cabeça dos alunos

de ideias inertes, lhes possam proporcionar conhecimento vivo, capaz de, como sugestivamente escreve Hills, citado por Neto (2003, p.3), constituir um “pavimento”, um “caminho para o futuro”.

A partir da década de 80 do século passado, e no que a questões relacionadas com o ensino e aprendizagem das ciências diz respeito, a História da Ciência passou a estar frutuosa e interligada à Filosofia da Ciência. Desde então a História e Filosofia da Ciência tornou-se um instrumento de primeira linha no combate ao desinteresse pela ciência. Refira-se, no entanto, que muitos autores, conscientes da vertente filosófica desta nova área disciplinar, continuaram a apelidá-la apenas por História da Ciência. Nós, em muitas situações ao longo da presente dissertação, somos um exemplo do que acabámos de referir.

Como professores de Física, consideramos ser de magna importância a formação em História e Filosofia da Ciência. Qualquer docente deve ter uma preparação sólida a nível científico, o que só é possível conhecendo os trilhos seguidos pelos cientistas do passado, compreendendo as hipóteses formuladas e rejeitadas, bem como os caminhos abandonados e os seguidos. Esta área disciplinar desempenha um papel fundamental na educação científica e na compreensão de determinados conceitos em ciência, tanto para professores como para alunos.

A narrativa histórica que criámos surge como um instrumento pedagógico que procura evidenciar a pertinência da utilização da História e Filosofia das Ciências no ensino das ciências, mostrando que “a ciência é uma maneira de pensar, muito mais que um corpo de factos” (Carl Sagan). A ciência é falível e não favorece verdades absolutas, vai-se construindo a partir de um encontro formidável entre factos precisos e um pensamento imaginativo.

Capítulo 3 – A favor de uma História com vida e que convida

“(...) compreender uma ciência é compreender e manejar a sua história, (...) praticá-la com criatividade é ainda não depreciar os seus antepassados”.

Mach¹

3.1. Utilização da História da Ciência no ensino

As vantagens da utilização da História da Ciência (não esquecendo a parte da Filosofia da Ciência) no ensino parecem ter ficado explicitadas no capítulo anterior. A questão que agora se levanta é saber que História da Ciência deverá ser aplicada e como colocá-la em prática.

Os manuais escolares e alguns textos de determinados cientistas poderão constituir recursos pedagógicos importantes na aplicação didática da História da Ciência. No entanto, e em relação aos primeiros, encontramos, como pretendemos ilustrar, uma forma de utilização dogmática (ver subcapítulo 3.3) com a qual tentaremos contrastar.

De acordo com Kubli (2005, p.512), um importante auxílio na educação científica, tanto para alunos como para professores, são os inevitáveis manuais escolares. Estes detêm uma grande importância e, conseqüentemente, uma enorme responsabilidade no processo ensino-aprendizagem das ciências, uma vez que estão entre os principais portadores de informação científica nas escolas. Kubli (2005, p.512) afirma que os manuais, e não apenas os professores, servem como guias, ou suportes, para desenvolver as mentes dos estudantes. São uma fonte de informação, funcionando para muitos alunos como a mais importante ajuda nos seus esforços para alcançar uma adequada compreensão das matérias. Podem também, promover alguma motivação intrínseca e, assim, facilitar o papel do professor neste domínio. Refira-se, contudo, que apesar dos manuais (e outros recursos informativos apropriados) poderem guiar e estimular o desenvolvimento do pensamento dos alunos, não substituirão o papel do professor, pelas razões já anteriormente trabalhadas (Vygotsky, etc.).

¹ Citado por Janeira (1985, p.285)

Muitos manuais de ciências incluem capítulos introdutórios dedicados à história da disciplina correspondente. Kindi (2005, p.721) refere que estes capítulos relatam grandes proezas, assinalam a data das grandes descobertas e homenageiam os heróis da área em questão. De acordo com o mesmo autor (2005, p.721), a maioria dos professores de Física e Química não gosta de perder tempo em coisas que consideram periféricas e, em vez de darem ênfase às interrogações que estão por detrás do conhecimento em questão, preferem concentrar-se num ensino cujo destaque é dado ao treino na resolução de exercícios.

Kindi (2005) apresenta algumas reflexões acerca da inclusão da História da Ciência no ensino das ciências, procurando responder à questão que inicialmente coloca: “Será que o ensino das ciências deve envolver a História da Ciência?” A partir da avaliação da perspectiva kuhniana, Kindi pretende reunir argumentos que lhe permitam dar resposta à questão que levantou. Segundo este (2005, p.721), Kuhn² estabelece a distinção entre a história que deve constar nos manuais para cientistas e a História da Ciência propriamente dita. De acordo com Fuller, referenciado por Kindi (2005, p.725), Kuhn empenhou-se em recomendar a doutrina do “segregacionismo historiográfico”, para sugerir que pode haver duas histórias da ciência: uma *boa*, para os historiadores e filósofos (a “elite”); e uma *má*, imprecisa, anacrónica e que deve constar nos manuais, destinada, sobretudo, aos que necessitam de adquirir uma imagem ideal da sua disciplina – os cientistas. Fuller, mencionado mais uma vez por Kindi (2005, p.725), sustenta que esta distinção serve um determinado propósito: Kuhn, ao reconhecer a importância educativa da história que consta nos manuais, procura promover e recomendar aos cientistas uma história ordenada e heróica, que funcione como o mito capaz de os seduzir. Ele quer proteger a autoridade da ciência e não deseja desiludir os cientistas, o que poderia suceder caso lhes fosse apresentada a verdadeira história da sua disciplina.

No seu livro *The Structure of Scientific Revolutions*, Kuhn discute o papel dos manuais e, em particular, a imagem do desenvolvimento científico que eles projectam.

² Breve biografia: Kuhn faleceu em 1996 com 73 anos de idade. Obteve o grau de doutor em física na Universidade de Harvard, em 1949. Ensinou ali até 1956, ano em que se tornou professor de História da Ciência na Universidade da Califórnia, em Berkeley. Entre 1964 e 1979 ensinou em Princeton. Nesse último ano transferiu-se para o Instituto Tecnológico de Massachusetts, onde exerceu funções como professor de Filosofia e História da Ciência até 1991. A sua obra mais importante é “A estrutura das revoluções científicas” publicada em 1962.

Kindi (2005, p.722) afirma que neste livro, Kuhn defende, entre outras coisas, o seguinte:

- Os manuais contribuem para a educação científica;
- A história da ciência, tal como aparece nos manuais, contribui para a educação científica;
- A história que encontramos nos manuais constitui-se como um substituto à verdadeira história e edifica a tradição da ciência;
- A história presente nos manuais aspira mostrar, falsamente, que o método da ciência e os problemas com que os cientistas se deparam são sempre os mesmos e em conformidade com o que a mais recente revolução científica legitimou.

Segundo Kindi (2005, p.722), para Kuhn, os manuais tanto funcionam ao nível da prática científica, como ao nível da ideologia. Em relação ao primeiro nível, eles proporcionam os meios (conceitos, problemas, critérios) para o desenvolvimento normal da ciência, enquanto que em relação ao segundo eles ajudam a construir a tradição científica que visa facilitar o progresso da ciência. Em consonância com a perspectiva de Kuhn, os manuais devem projectar uma imagem de contínuo e constante desenvolvimento, que conduz metodologicamente à última verdade. Contrariedades históricas e passos errados são atribuídos a factores externos à ciência (idiossincrasias pessoais, termos técnicos pobres, etc.) como tal, são colocados de lado e não devem constar da história patente nos manuais. Kindi (2005, p.722) salienta que, de acordo com a teoria kuhniana, a história da ciência abordada nos manuais, seja nos capítulos introdutórios ou na apresentação de determinados conteúdos, contribui para proteger o estabelecimento do paradigma que prevalece após um período de crise³.

A partir do artigo de Kindi, verificamos que, de um modo geral, Kuhn realça a importância da retrospectiva histórica presente nos manuais. Apesar de a considerar *má história*, advoga que é uma condição indelével para a prática científica. Com este tipo de história pretende que os heróis do passado, apesar do seu trabalho poder ser

³ De um modo geral, para Kuhn, a História da Ciência é feita de alternâncias entre períodos de “Ciência normal” e períodos de “Ciência extraordinária” (ou períodos de crise). A “Ciência normal” é a regra, o que acontece normalmente, enquanto que a “extraordinária” é a excepção. Durante os períodos de Ciência normal os cientistas são conservadores, resistindo à mudança. Os períodos de Ciência extraordinária correspondem precisamente ao contrário, ou seja, a momentos de revolução científica. Neste, os cientistas põem os antigos paradigmas em causa e procuram novas teorias, de acordo com o novo paradigma.

distorcido e mal interpretado, funcionem como modelos que orientam o que os cientistas devem fazer. Kuhn defende que, se a ciência for vista como uma prática e não como um conjunto de proposições formando uma teoria, então, a história dos manuais (a *má história*) contribui para estabelecer e expandir o novo paradigma (Kindi, 2005, pp.721, 728, 729). Tendo por base as considerações de Kuhn, Kindi (2005, p.729) responde, taxativamente, à questão que inicialmente formulou – A História da Ciência deve ser incluída na educação científica. Acrescenta também que, se o objectivo da ciência é preservar até mesmo a mais remota relação do que sabemos hoje sobre ciência, então, só se pode ensinar da forma como os cientistas o fazem, ou seja, com o auxílio da *má história* presente nos manuais. Defende, portanto, que o outro tipo de história, a história dos historiadores e filósofos, não pode ser encarada como parte da educação científica dos alunos, contribuindo apenas para a cultura geral dos mesmos.

Esta discussão, à volta das ideias de Kuhn, tem tido prolongamentos que se têm centrado na discussão à volta da impossibilidade de utilizar a História da Ciência na educação científica. Veja-se por exemplo os artigos à volta da pseudohistórias (como veremos mais adiante). O contacto com toda esta discussão que se tem mantido nos últimos vinte anos foi para nós de grande importância em termos de formação pessoal. Permitiu-nos o contacto com diferentes perspectivas do que é a História da Ciência, o que torna a problemática da sua utilização nos contextos educativos ainda mais complexa. A narrativa histórica que pretendemos desenvolver terá como ingredientes fundamentais a natureza problemática associada ao desenvolvimento do conhecimento científico e a imaginação associada às soluções encontradas para os problemas. Hoje, já não será uma história dogmática que motivará os alunos, pressuposto fundamental no desenvolvimento deste trabalho.

Heilbron (2001, p.5) defende que os historiadores e filósofos da ciência devem fornecer material pedagogicamente adequado aos autores dos manuais escolares, para que os professores de ciências possam fazer da história da sua disciplina uma parte significativa do seu trabalho pedagógico. Paralelamente, consideramos que investigadores em Educação Científica também poderão contribuir com problemáticas nesta área. Pensamos que a História da Ciência nos manuais deveria ser menos descritiva e dogmática.

Como forma de sustentar a nossa argumentação, começemos com um excerto do artigo *Ensino das Ciências: Reflexões e Comparações*, de Teresa Peña e Jorge Dias de

Deus, apresentado na Conferência “A Física na Formação em Engenharia e Tecnologia”, no dia 13 de Outubro de 2005, em Coimbra:

“Nas sociedades desenvolvidas, existe hoje uma contradição profunda entre a importância da ciência e a tecnologia (C&T), por um lado, e o modo como se pensa a C&T, por outro. Essas sociedades assentam cada vez mais na C&T, mas o prestígio da C&T parece estar em declínio. Tal traduziu-se, em particular, no afastamento dos jovens das profissões ligadas à C&T, nomeadamente as engenharias. Se há sempre um fascínio pelo novo e pelo progresso que a ciência costuma trazer, também a desconfiança na inutilidade ou nos exageros da ciência é generalizada...

O problema parece ser geral. Os anos gloriosos para a C&T, após a Segunda Guerra Mundial, quando o atómico e o nuclear, quer à esquerda quer à direita, eram promessas de progresso, já passaram. O élan da aventura espacial dos anos 60 também rapidamente se desvaneceu. Os desperdícios bélicos dos anos 80, ligados à Guerra das Estrelas, não ajudaram à imagem. Ao longo dos anos 90, a volatilidade, a renovação permanente do conhecimento científico, e a banalização das tecnologias como “caixas pretas” cada vez mais *user-friendly*, vulgarizaram a C&T, reduzindo a imagem da ciência ao que é para ser aplicado, usado e descartado. A atracção da C&T ficou-se pelo espectáculo, isto é, pelo que é para ser admirado e consumido, mas para ser feito pelos “outros com características especiais”.

...

Não importa agora recuperar uma confiança cega na C&T, mas reconhecer que as sociedades modernas precisam de pessoas qualificadas em C&T, pois sem elas as sociedades não seriam estruturalmente sustentáveis. Ao longo da história, a economia e a educação sempre se alimentaram mutuamente. No momento presente deste ciclo simbólico, o sentido do percurso actual é o da economia a puxar pela educação (em ciência). Já aconteceu antes: Comenius, pedagogo checo, no século XVII defendia que se generalizasse a todos o ensino dos “ofícios” e também das “letras”, tendo para isso de vencer o peso do argumento aristocrático de que, com esta generalização da educação, deixariam de existir artesãos. É bem actual o sonho de Comenius: “Se se fornecer aos jovens uma boa educação, ninguém no futuro vai sentir falta de boa matéria prima para pensar, desejar, ambicionar e trabalhar”.

Na luta pela competitividade, hoje reconhece-se, como Comenius no passado, que os “ofícios” se transmutaram e só não morrem se se renovarem com uma injeção de “letras”, a que têm de acrescentar-se. A educação é cara, mas a ignorância sai ainda mais cara, pois paga-se em pobreza e infelicidade. E a educação em ciências é decerto para todos, pois todos precisam da ciência, ou pelo menos da adaptação à mudança que a ciência dá: industriais, professores, empresários, artistas, etc.

Em simultâneo e contraditoriamente, existe um desencantamento muito generalizado com a C&T. Quais são as origens deste desencanto? Há muitas causas ligadas à sociedade em geral: a subestima das questões éticas, ambientais e de segurança, e o crescimento, em especial nos EUA, do irracionalismo fundamentalista, do misticismo, e do relativismo pós modernista... Em “Science and Technology Education Current Challenges and Possible Solutions”, Svein Sjøberg, da Universidade de Oslo, na sua contribuição convidada ao encontro de ministros da educação e da investigação que teve lugar em Uppsala, apresentou treze razões para o desencanto em C&T... Além das razões já indicadas, Sjøberg põe claramente em cima da mesa a dificuldade e a exigência das ciências duras. Aprender-las implica

inevitavelmente esforço, frustração, enquanto a sociedade actual facilita, não treina, a resistência à dor. E aponta também a transformação do estereótipo do cientista que a nova *Big and Techno Science* trouxeram: de egocêntrico, sonhador e romântico, o cientista passou a ser apenas um entre muitos de uma grande equipa, sem visibilidade e feitos próprios...(pp.32, 33)

A nossa posição sai ainda mais reforçada se levarmos em consideração o que estes dois conceituados investigadores portugueses assinalam no excerto. Como os autores referem, assistimos hoje, nas sociedades desenvolvidas, a uma profunda contradição entre a importância da ciência e da tecnologia, por um lado, e o modo como se pensa a C&T, por outro. A atracção pela C&T ficou-se pelo espectáculo, pertencendo apenas aos domínios da admiração e do consumo, mas para ser feito pelos “outros com características especiais”. Como resultado, regista-se um desencantamento muito generalizado com a C&T e um afastamento dos jovens das profissões ligadas às áreas científicas como, por exemplo, as engenharias. Nós, professores de Física e Química dos ensinos básico e secundário, somos os primeiros a constatar esta dura e preocupante realidade. O que encontramos nas escolas é uma ampla desmotivação para a aprendizagem das ciências, no entanto, verificamos que se regista nos jovens um consumo exacerbado das novas tecnologias (computadores, consolas, telemóveis, etc.), sem que isso desperte neles o interesse pelo estudo das ciências. Como é mencionado no excerto anterior, aprender as ciências duras implica inevitavelmente esforço, frustração, enquanto a sociedade actual facilita e não estimula qualidades como: perseverança, firmeza, constância, tenacidade e persistência. Defendemos pois, que a melhor forma de motivar os alunos para a aprendizagem das ciências (revelando-lhes, através de exemplos do passado, que a aprendizagem das ciências acarreta esforço, dedicação, entusiasmo, mas também frustração), é através de uma utilização da História e Filosofia da Ciência, mediada por professores e fruto dos seus trabalhos de investigação neste âmbito, centradas em estudos de caso (como alguns autores têm vindo a defender). É este tipo de história não hermética, que problematiza, levanta questões, humaniza e não é imune às interrogações e dúvidas com as quais a ciência se foi e vai confrontando, que permite, numa primeira etapa, motivar os alunos para a aprendizagem da ciência e, numa segunda etapa, consciencializá-los que para aprender e fazer ciência é necessário muito esforço e dedicação, compensados pela vivência de algo que nos transcende: o encontro da imaginação científica com os “factos” científicos.

A motivação para a aprendizagem das ciências é actualmente (final da primeira década do século XXI) um entrave ao desenvolvimento das sociedades ditas tecnológicas, como tal, é impreterível que a história a privilegiar, sobretudo nos dos ensinos básico e secundário, não assente numa história descritiva e inerte, mas sim numa história estimulante. Recuperemos então uma passagem de Carvalho e Vannucchi (2000) como forma de sustentação da nossa argumentação:

Ignorando os aspectos históricos e filosóficos da ciência, geramos uma visão pré-conceituada da actividade científica; uma visão baseada em conceitos empírico-indutivos – uma ciência sendo composta por verdades inquestionáveis. Esta postura rígida e intolerante nega, ou pelo menos subestima, a criatividade inerente ao trabalho científico, criando obstáculos invencíveis ao ensino da ciência (p.428).

Saliente-se, no entanto, que a grande maioria dos manuais escolares apresenta uma história inerte e pouco apelativa (voltaremos a este assunto mais adiante).

Como referimos no início deste subcapítulo, para além dos manuais escolares, alguns textos de determinados cientistas poderão constituir recursos pedagógicos importantes na aplicação didáctica da História da Ciência. Stengers, referenciada por Costa (2005, p.42), enquadra-se no grupo dos que defendem que os estudantes devem recorrer à literatura “criadora” da especialidade que escolheram. De acordo com a perspectiva construtivista, compete ao professor confrontar os alunos com situações problemáticas sobre a ciência, visando debatê-las na sala de aula. Para o efeito, poder-se-ão seleccionar excertos de obras que se considerem de maior interesse e analisá-los em conjunto com os alunos, não descurando as repercussões sociais e culturais neles evidenciados. A partir das discussões histórico-filosóficas que obviamente se levantam, será possível tirar partido de uma maior aproximação entre os estudantes e os problemas que se colocaram aos cientistas. Através do conhecimento dos percursos sinuosos que estes últimos atravessaram e dos motivos que os levaram a abandonar certas teorias em favor de outras, poderá facilitar o entendimento, por parte dos estudantes, que certas ideias que pareciam fazer sentido, afinal, poderão ser substituídas por outras mais apropriadas. Existem textos que poderão vir a tornar-se instrumentos pedagógicos na utilização da História da Ciência na sala de aula. Saliente-se, todavia, que para estes se tornarem verdadeiros recursos pedagógicos, muito trabalho há a fazer sobre os mesmos.

A obra histórica de Galileu, “O Diálogo sobre os dois maiores Sistemas do Mundo”, constitui-se como um bom exemplo daquilo que pode ser utilizado no ensino da Física. A partir da análise, ou até mesmo, da dramatização de alguns excertos, o professor poderá efectuar uma abordagem à Lei da Inércia, baseada na História da Ciência e diferente do que habitualmente se faz. Galileu é uma das maiores referências no Universo da Física, sobretudo na mecânica.

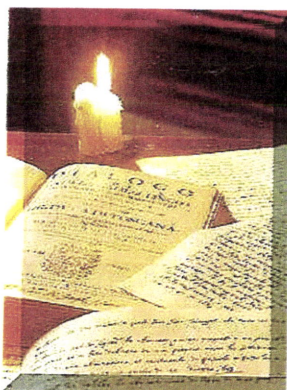


Figura 3: O “Diálogo”⁴

A obra de Galileu é de uma riqueza tal, que alguns dos seus textos podem ser extremamente úteis na introdução de temáticas para as quais não contribuiu directamente, como, por exemplo, o atomismo. Muitos alunos sentem dificuldades em aceitar a ideia de átomo como entidade física, pois é algo que não está ao alcance dos seus sentidos. Como forma de se iniciar uma possível explicação acerca da realidade atómica, sugerimos que se utilizem dois excertos da encantadora e profunda alegoria de Galileu sobre os motivos, métodos e limitações da “filosofia experimental” – *Il Saggiatore*. Koestler (1969, pp. 432, 433) apresenta esses dois excertos, estabelecendo entre eles uma preciosa conexão. Foi a partir da obra de Koestler que tivemos conhecimento destes momentos de rara beleza. Vejamos então: (sob pena de se perder algum valor linguístico numa tradução para língua portuguesa, mantivemos a versão inglesa)

Once upon a time, in a very lonely place, there lived a man endowed by nature with extraordinary curiosity and a very penetrating mind. For a pastime he raised birds, whose songs he much enjoyed; and he observed with great admiration the happy contrivance by which they could transform at will the very air they breathed into a variety of sweet songs.

⁴ Imagem retirada do site: <http://atelier.uarte.mct.pt/rota-do-tempo/Fisicos/Galileu.htm>

One night this man chanced to hear a delicate song close to his house, and being unable to connect it with anything but some small bird he set out to capture it. When he arrived at a road he found a shepherded boy who was blowing into a kind of a hollow stick while moving his fingers about on the wood, thus drawing from it a variety of notes similar to those of a bird, though by a quite different method. Puzzled, but impelled by his natural curiosity, he gave the boy a calf in exchange for this flute and returned to solitude. But realising that if he had not chanced to meet the boy he would never have learned of the existence of a new method of forming musical notes and the sweetest songs, he decided to travel to distant places in hope of meeting with some new adventure.

Subsequently, the man discovered that there are many other ways of producing musical notes – from strings and organs, to the swift vibrations of mosquitoes and the “sweet and sonorous shrilling of crickets by snapping their wings together, though they cannot fly at all”. But there was an ultimate disappointment waiting for him:

Well, after this man had come to believe that no more ways of forming tones could possible exist... when, I say, this man believed he had seen everything, he suddenly found himself once more plunged deeper into ignorance and bafflement than ever. For having captured in his hands a cicada, he failed to diminish its strident noise either by closing its mouth or stopping its wings, yet he could not see it move the scales that covered its body, or any other thing. At last he lifted up the armour of its chest and there he saw some thin hard ligaments beneath; thinking the sound might come from their vibrations, he decided to break them in order to silence it. But nothing happened until his needle drove too deep, and transfixing the creature he took away its life with its voice, so that he was still unable to determine whether the song had originated in those ligaments. And by this experience his Knowledge was reduced to diffidence, so that when asked how sounds were created he used to answer tolerantly that although he knew a few ways, he was sure that many more existed which were not only unknown but unimaginable.

De acordo com Koestler (1969, p.433), Galileu foi o primeiro de um grupo de cientistas experimentais modernos a convencer-se da infalibilidade dos seus “exactos métodos empíricos”. Para Koestler (1969, p.433), é com surpresa que o ouvimos falar sobre coisas “não só desconhecidas, mas inimagináveis”. Todavia, acrescenta o autor (1969, p.433), que esta última modéstia de Galileu deriva da sua aproximação ao misticismo, encontrada em todos os grandes cientistas (mesmo se escondida por detrás de uma arrogante fachada, manifestando-se unicamente em raras ocasiões).

Estas passagens, exploradas adequadamente nas aulas de Física, poderão constituir-se como chaves de ouro a uma abordagem acerca da natureza do conhecimento científico. Uma vez aberta a porta, utilizando as chaves de quem, segundo Koestler, não admitia as limitações e falibilidade dos métodos empíricos, será possível introduzir, de uma forma mais significativa, inúmeros conteúdos do Universo da Física. No nosso caso particular, entendemos que é possível estabelecer conexões frutíferas entre esta alegoria e a hipótese atômica. Como referimos anteriormente, os alunos dos ensinos básico e secundário sentem imensas dificuldade em aceitar a ideia de átomo, algo que para eles é “desconhecido” e “inimaginável”. Consideramos, portanto, que estes excertos podem funcionar como um *click* rumo à aceitação, por parte dos alunos, de que existem muitas coisas, apesar de poderem ser para eles desconhecidas e inimagináveis (como os átomos), que podem pertencer ao mundo do real. Para além disso, a utilização de um recurso pedagógico como esta alegoria de Galileu, poderá representar um forte estímulo, uma fonte de motivação, para o estudo de conteúdos relacionados com a teoria atômica.

A contextualização histórica do conhecimento pode proporcionar uma relação mais madura e equilibrada com o conhecimento científico. A utilização da História da Ciência no ensino pode ter proveitosos resultados, tanto a nível cognitivo como afectivo. No entanto, para se retirarem proveitos efectivos da utilização pedagógica da História da Ciência, importa reflectir acerca da forma como esta é abordada nos diversos materiais didácticos. À medida que se foram construindo materiais didácticos com referência à História da Ciência, surgiram diversas preocupações, designadamente, se a História da Ciência apresentada nesses materiais estaria explorada de forma adequada para desenvolver nos estudantes os efeitos desejados. Actualmente, vários são os autores que alertam para o perigo de uma utilização indevida da História da Ciência no ensino, argumentando que a mesma, ao invés de minimizar os problemas dos alunos face ao estudo da ciência, como é desejado, poderá contribuir para os agravar.

Allchin (2004) é um dos autores que chama a atenção para alguns dos perigos associados a uma má utilização da História da Ciência no ensino. Relaciona estes perigos com algo a que chama pseudohistória e compara-a à pseudociência, cujas vertentes são, entre outras, a parapsicologia e a astrologia. Na pseudohistória, Allchin (2004, p.179) situa todas as histórias que usam os factos selectivamente e promovem imagens enganosas acerca da natureza da ciência; histórias que romantizam cientistas, inflamam o drama das suas descobertas e simplificam excessivamente o processo da

ciência. No seu artigo (2004), o autor indica várias pistas para que as pseudohistórias possam ser identificadas pelos professores, evitando que estes as utilizem em contexto de sala de aula. De um modo geral, Allchin alerta para os perigos da utilização das pseudohistórias, salientando que estas podem ser uma forte influência na construção de “estereótipos desnecessários e ideias falsas acerca de como a ciência funciona” (2004, p.180).

No subcapítulo seguinte, daremos relevo a um outro recurso que também poderá ser utilizado na aplicação didáctica da História da Ciência – as narrativas históricas com valor pedagógico. Sendo um dos objectivos da utilização da História da Ciência no ensino introduzir elementos que facultem a aproximação à natureza da ciência, uma narrativa histórica deve insistir no rigor como via metodológica. Portanto, uma história de cariz didáctico, ao procurar ser mais interessante, jamais deverá moldar os factos e transferir para segundo plano o rigor, ou por outras palavras, não deverá reunir as características que a tornem numa pseudohistória.

3.2. Surpresas históricas na narrativa histórica

“O aluno do ensino secundário sente-se, em geral, pouco atraído pelo estudo da Física. Acha as aulas fastidiosas, as matérias difíceis, a exigência dos professores injustificada.”

J.N. Urbano⁵

Este comentário de J.N. Urbano traduz, de uma forma abrangente, a preocupante realidade que se vive nas aulas de Física do ensino secundário (também podemos extrapolar para o ensino básico). Perante esta situação, uma questão subsequente se coloca: como levar o aluno a tomar a decisão de realizar esforços deliberados para aprender física ou, por outras palavras, como ajudá-lo a accionar os seus mecanismos de motivação? Para isso, parece-nos forçoso utilizar procedimentos didácticos susceptíveis de, efectivamente, desencadear motivação, isto é, de imprimir uma real predisposição para a aprendizagem, através da realização das tarefas constitutivas desses procedimentos. Na verdade, como salienta Neto (1998, p.97), muitos alunos encaram a Física como assunto complexo, abstracto e desligado do quotidiano, criando a

⁵ Citado por Neto (1998, p.29)

convicção de que, ao contrário deles próprios, os cientistas constroem a ciência praticamente sem esforço. Para esse estado de espírito, muito tem contribuído a forma linear e “económica” como a matéria lhes é explicada.

Procurando combater o actual desencantamento pela aprendizagem das ciências, muitas instituições de ensino superior têm levado a cabo iniciativas que visam a promoção da ciência e dos cursos que ministram junto dos alunos do ensino secundário. Uma das mais recentes foi organizada pelo Departamento de Engenharia Química e Biológica do Instituto Superior Técnico:

NOTÍCIAS⁶

Laboratórios de portas abertas

Joana Santos 2007-02-06

O Instituto Superior Técnico recebe, pelo terceiro ano consecutivo, alunos do Ensino Secundário de todo o País. Laboratórios Abertos 2007 é uma oportunidade para os estudantes passarem da teoria à prática.

Cerca de 1800 alunos de 30 escolas do País vão passar até ao final da próxima semana pelos laboratórios do departamento de Engenharia Química e Biológica do Instituto Superior Técnico, em Lisboa. A razão é simples: um convite para o mundo da ciência e da tecnologia com a promessa de algumas experiências à mistura.

Vindos de todo o País, estes estudantes têm à sua espera cerca de duas horas e meia de experiências que muitos não têm oportunidade de viver nos próprios estabelecimentos de ensino, podendo aqui ver como se passa da teoria à prática.

...

A iniciativa não é nova. Os laboratórios estão abertos às escolas desde 2005. Com este projecto, os responsáveis do Departamento de Engenharia Química e Biológica pretendem encenar experiências com todos os alunos do Ensino Secundário presentes, dar a conhecer os laboratórios e os diferentes trabalhos que aí se fazem e, ao mesmo tempo, divulgar a ciência e tecnologia. ... O balanço "tem sido muito bom" e por isso mesmo a iniciativa repete-se ano após ano.

...

Entendemos que estas acções, vulgarmente designadas por “Laboratório Aberto”/“Laboratório de Portas Abertas”, destinadas sobretudo a alunos do secundário, dispensam um prestimoso auxílio no combate à desmotivação que se regista no âmbito da aprendizagem das ciências. Iniciativas destas, associadas a estratégias de ensino

⁶Notícia retirada de: <http://www.educare.pt/educare/Educare.aspx>

experimental das ciências podem ser vias de motivação importantes. Ou seja, não estamos a propor que a História da Ciência seja a via para o desenvolvimento do gosto pelo conhecimento científico, mas poderá ser uma das vias. Iniciativas tipo “Laboratório Aberto” e a utilização da História da Ciência são de natureza muito diferente. A utilização da História da Ciência exige uma maior preparação e será menos “episódica”. É evidente que à História da Ciência deverá estar sempre associada, ainda que de forma distinta e de acordo com o nível etário e escolar dos estudantes, a Filosofia da Ciência. Caamaño (1996) é um dos autores que atribui elevado destaque à vertente epistemológica no ensino das ciências a alunos do ensino secundário:

A compreensão da natureza da ciência deve ser um objectivo a abordar-se no ensino secundário obrigatório, para ajudar a formar uma visão epistemologicamente válida da ciência e da explicação científica, modificando certas visões estereotipadas que a investigação didáctica mostrou que têm muitos estudantes e alguns professores (p.43)

No subcapítulo anterior, salientámos que os manuais escolares e os textos históricos de cientistas podem constituir recursos pedagógicos importantes na aplicação didáctica da História e Filosofia da Ciência a alunos dos ensinos básico e secundário. No presente subcapítulo, pretendemos dar relevo a um outro recurso que também poderá ser utilizado neste domínio – as narrativas históricas com valor pedagógico.

De entre as possibilidades a que poderíamos recorrer para a aplicação didáctica da História e Filosofia da Ciência, a nossa escolha recaiu sobre a construção de uma narrativa histórica com valor pedagógico, a qual, dedicando particular ênfase à discussão em torno da realidade atómica, pretende retratar a evolução do conceito de átomo até à sua afirmação enquanto entidade física. Os principais motivos que contribuíram para esta escolha prendem-se, em parte, com a importância que uma narrativa pedagógica pode ter na construção do conhecimento. Bruner (2000, p.163) salienta que a narrativa é importante enquanto modo de pensar, como estrutura de organização do conhecimento e como veículo no processo da educação, em particular, na educação científica. De acordo com o mesmo autor (2000, p.163), a narrativa é, provavelmente, a maneira mais natural e mais primitiva de organizarmos a nossa experiência e o nosso conhecimento.

Bruner (2000), à semelhança das mais recentes orientações didácticas para o ensino das ciências, aponta para a importância do “currículo em espiral”, defendendo

que a narrativa pode constituir-se como um recurso apropriado para a aplicação deste tipo de currículo. De acordo com o autor:

... ao ensinar um assunto, se começa por um relato “intuitivo”, que se adapta ao alcance do estudante, e depois dá uma volta atrás para um relato mais formal e mais rigorosamente estruturado, até que, embora muitas mais reciclagens sejam necessárias, o aluno tenha dominado a matéria com a sua plena faculdade gerativa. (p.163)

Pode também ser verdade que os inícios, as transições e a plena compreensão das ideias num currículo em espiral dependem do encaixe dessas ideias numa forma narrativa.

De um modo geral, a forma narrativa, baseada num currículo em espiral, visa promover uma primeira aproximação entre os alunos e determinados conceitos científicos, para que depois e com a ajuda do professor, o conhecimento sobre esses conceitos seja aprofundado. A utilização da narrativa no ensino pode ser, de facto, vantajosa e tem de ser preciosa do ponto de vista pedagógico. Uma narrativa é preciosa quando tem um bom motivo a seu favor “que a distinga do silêncio” (Bruner, 2000, p.163), pois contém em si um sentido que mais facilmente será apreendido pelo aluno.

Para que uma narrativa se constitua num instrumento a ter em conta no processo ensino-aprendizagem das ciências, será necessário efectuar uma correcta selecção dos eventos a incluir na mesma. Feita a selecção, e de modo a que a narrativa se torne agradável aquando do momento da leitura, os eventos devem ser dispostos de uma forma simples e organizada. No que diz respeito à selecção de eventos a incluir na narrativa, Kubli (2001, pp.596-598) sugere que se vá de encontro aos objectivos traçados e se sigam os procedimentos necessários à promoção de uma narrativa interessante. Em relação às narrativas com um fim didáctico, Kubli (2001, p.596) salienta que os elementos verdadeiramente didácticos se manifestam por si só através da simplicidade do enredo e na clareza e precisão das descrições. Tal, segundo o mesmo, evita mensagens intrusas e conduz o leitor ou o ouvinte ao ponto que se pretende sem uma moralização. À semelhança de muitos outros autores, também Kubli realça a importância de fazer diminuir o distanciamento que os estudantes sentem em relação aos cientistas. No caso de uma narrativa histórica com um fim didáctico, este defende que a utilização da ironia poderá contribuir para reduzir o referido afastamento. Citando Kubli (2001):

A ironia é uma espécie de condimento que ajuda a “digerir” o conteúdo da história. É altamente recomendado quando se trata de heróis de física. Ajuda os estudantes a vê-los como de facto são. Não gostamos de ser confrontados com pessoas que são intelectualmente ou moralmente superiores a nós, a menos que a narrativa nos ajude a sentirmo-nos iguais a eles (...) um pouco de ironia (...) até ajuda a uma familiarização com o seu pensamento. (p.597)

A narrativa histórica é um meio privilegiado para a divulgação de “surpresas históricas”, mostrando que os trabalhos desenvolvidos pelos cientistas nem sempre se traduzem por trajectos lineares, imaculados e desprovidos de erros. Segundo Stuewer (2006, p.521), as sucintas histórias sobre física que são apresentadas aos alunos nas aulas de física assentam, basicamente, numa história linear, isto é, traduzem a ideia de que os físicos, ao efectuarem as suas descobertas, seguem um “Caminho Real” até às mesmas. Contudo, a grande maioria dos caminhos que estes traçaram até às suas descobertas não se traduziu por um percurso linear. Stuewer (2006, p.521) afirma que quando os historiadores disponibilizam aos estudantes os verdadeiros trilhos seguidos pelos cientistas, estes expressam surpresa. De acordo com este autor (2006, p.521), estas “surpresas históricas” podem constituir-se como um elemento importante para a aprendizagem da física, na medida que humaniza os cientistas e os aproxima dos alunos. Efectivamente, as narrativas históricas são um veículo primordial para que professores e alunos possam contactar com as questões, hesitações, soluções imaginativas e erros com que se depararam os cientistas, ou seja, com as inúmeras “surpresas históricas” inerentes à prática científica. Na narrativa histórica que criámos, procurámos não descurar esta importante questão. A partir da nossa «Aventura do Átomo» os estudantes podem, por exemplo, ficar a conhecer que Planck, o pai da teoria quântica e um atomista convicto, foi durante muito tempo reticente em relação à teoria atómica.

Aquando da elaboração de um instrumento didáctico como uma narrativa histórica o autor tem de ter em conta os seus possíveis leitores. Esta deverá assentar num determinado nível científico e em determinados valores, supostamente aceites pelos leitores a que se destina. Em relação a esta questão Kubli (2001) afirma:

O texto pressupõe um leitor implícito com uma certa faculdade para entender os conceitos ou argumentos, e um autor implícito que converse com os seus leitores. Um bom texto está construído sobre um determinado nível intelectual e também está baseado num determinado sistema de valores que implicitamente são supostos ser aceites (...) O leitor ou o ouvinte implícito é um dos elementos mais importantes de uma história. (p.597)

A uma narrativa histórica com verdadeiro valor pedagógico deverá estar sempre associado, para além de tudo aquilo que referenciámos até ao momento, um elemento especial – a criatividade. À frase de Mach, “Como compreender uma ciência é compreender e manejar a sua história, como praticá-la com criatividade é ainda não depreciar os seus antepassados”, podemos acrescentar o seguinte: A prática científica será tanto mais estimulante e criativa, quanto maior for o índice de imaginação associado à narração da história de uma determinada ciência.

Convencidos da importância que uma narrativa histórica com valor pedagógico pode ter ao nível do processo ensino-aprendizagem das ciências, procurámos edificar a «Aventura do Átomo» tendo em consideração todos os pontos anteriormente focados. Começamos por referir o público-alvo desta narrativa. De acordo com os objectivos traçados, é evidente que a mesma foi escrita a pensar nos alunos e professores de Física (directamente, a narrativa destina-se a estes dois grupos, no entanto, poderá funcionar simultaneamente como uma importante fonte de divulgação e promoção da ciência junto de aglomerados que, à partida, estão afastados da ciência e da prática científica). Fazendo uso de uma linguagem simples e rigorosa, pretendemos disponibilizar um instrumento didáctico que poderá ser utilizado pelos professores e alunos na sala de aula e fora dela. A sua aplicação didáctica em sala de aula poderá passar pela exploração de excertos escolhidos pelo professor, cabendo a este, professor construtivista, a tarefa de orientar os alunos para uma possível leitura individualizada da narrativa num contexto diferente. Procurámos elaborar uma narrativa que fosse o mais transversal possível, ou seja, que pudesse ser utilizada desde o terceiro ciclo do ensino básico até ao ensino superior (é evidente que para alunos mais novos, o professor deverá prestar um maior auxílio na interpretação dos excertos que utilizar). Ainda neste âmbito, convém explicitar as possíveis interligações que se poderão estabelecer entre a «Aventura do Átomo» e os assuntos a abordar, relacionados com a teoria atómica, em cada ciclo de ensino. Assim:

- 3º Ciclo – O primeiro contacto entre os alunos e a hipótese atómica tem lugar nesta fase. Da forma como este assunto for abordado dependerá, e muito, o sucesso que estes terão na compreensão do mesmo, bem como, a sua motivação para o prosseguimento e aprofundamento dos estudos neste domínio. Alguns excertos da «Aventura do Átomo» poderão utilizar-se para apresentar a temática

em questão de uma forma mais apelativa. Outros contribuirão, de uma forma sustentada, para que a realidade atómica adquira significância na mente dos alunos e para que estes compreendam alguns aspectos relacionados com a natureza do conhecimento científico;

- Secundário – À partida, os alunos que frequentam este nível de ensino pertencem a um estágio de desenvolvimento cognitivo hierarquicamente superior. Desta forma, a «Aventura do Átomo» adquire uma maior significância, podendo contribuir activamente para uma melhor compreensão de determinados assuntos relacionados com a hipótese atómica. A compreensão do que representa o número de Avogadro, que os alunos tanto utilizam em exercícios de carácter quantitativo, é apenas um dos exemplos onde essa contribuição se poderá vir a registar. Simultaneamente, a nossa narrativa poderá funcionar como um instrumento promotor de alguma reflexão em torno da natureza do conhecimento científico.
- Superior – Os estudantes que frequentam este nível de ensino poderão usufruir, na plenitude, da nossa narrativa. A mesma possibilitará uma reflexão acerca de alguns aspectos relacionados com a teoria atómica e com a natureza do conhecimento científico. Contudo, consideramos que para estes alunos, o mais interessante estará relacionado com a explicação do movimento browniano e a consequente afirmação do átomo enquanto entidade física. A discussão que se gerou, nos finais do século XIX e princípios do XX, em redor da realidade atómica será, obviamente, um foco de atenção para os mesmos.

No que diz respeito à estrutura da «Aventura do Átomo», refira-se que muitos dos conteúdos que a constituem estão organizados em espiral. Este tipo de organização traduz-se por uma primeira abordagem a determinados assuntos, que serão retomados e progressivamente desenvolvidos em etapas posteriores. Para além das vantagens mencionadas anteriormente por Bruner, optámos por esta estrutura, pois consideramos que uma primeira abordagem permitirá estimular a curiosidade dos leitores e assim contribuir para a subsequente exploração da narrativa. O enredo está direccionado para a discussão que se gerou, nos finais do século XIX e princípios do século XX, em torno

da realidade atômica e que culminou, em 1908, com a afirmação dos átomos enquanto entidades físicas.

Quanto à coerência histórica, saliente-se que todo o nosso trabalho foi pautado pelo rigor. Baseando-nos em trabalhos de historiadores da ciência, em narrativas históricas com valor pedagógico e em alguns textos históricos, procurámos interligar de forma significativa e coerente os vários capítulos e subcapítulos da «Aventura do Átomo». Só uma narrativa com coerência histórica poderá aspirar a que o leitor se envolva de tal modo, que se sinta quase a viver a história. Se a uma narrativa histórica estiver associado, para além da coerência histórica, uma escrita cativante, clara e rigorosa, então estarão reunidas as condições para que esta se assuma como uma história com vida e que convida a entrar na aventura da ciência! Na presente dissertação, trabalhámos arduamente para tentar conferir esse estatuto à nossa «Aventura do Átomo».

De um modo geral, a narrativa histórica que criámos foi edificada visando os seguintes objectivos:

- Construir um instrumento didáctico que possa ser útil no combate à desmotivação pela aprendizagem das ciências e, em particular, da Física;
- Colocar ao dispor de alunos e professores um complemento à história que encontramos nos manuais escolares;
- Promover a reflexão em torno da natureza da ciência, exibindo aspectos que estão relacionados com a construção do conhecimento científico;
- Contribuir, com ideias, para a construção de narrativas históricas com valor pedagógico;
- Aumentar a cultura histórica e científica de quem investiga, ajudando-o a perspectivar a didáctica de forma crítica;
- Accionar os mecanismos de motivação intrínseca, contribuindo para impulsionar o interesse pelo estudo de vários aspectos relacionados com a teoria atômica;

3.3. O que não fazem os manuais escolares?

No capítulo 1 já expressámos a nossa insatisfação pela história que encontramos (quando encontramos) nos manuais escolares. De acordo com Leite (2002):

“A história da ciência pode melhorar o ensino-aprendizagem da ciência mas se for usada inadequadamente pode antes distorcer as ideias dos alunos sobre a natureza da ciência e sua inter-relação com a tecnologia, a política e a religião (...) de facto, o efeito de usar a história da ciência na educação em ciências depende maioritariamente de que história da ciência é usada e como é usada” (p.343)

Leite (2002, pp.333-334) salienta que os programas de Física e de Química, utilizados nos ensinos básico e secundário portugueses, são pouco explícitos no que se refere à importância a conceder à natureza do conhecimento científico. Segundo a mesma, esta situação contribui para que os autores dos manuais não se sintam particularmente compelidos a dar suficiente atenção à História da Ciência, incluindo apenas breves descrições históricas nos seus manuais. Desta forma e segundo Leite (2002, pp.334-335), se os professores tiverem tendência para seguir o manual escolar e se os autores dos manuais escolares não se sentirem incitados a dar importância suficiente à história da ciência, então pouco conteúdo histórico deverá ser esperado nas aulas de ciências.

Convém referir, todavia, que os manuais são, normalmente, os únicos meios colocados ao dispor dos alunos, onde estes podem contactar com alguns aspectos relacionados com a História da Ciência. Sendo assim, consideramos pertinente fazer uma pequena incursão (sem contudo, efectuar uma análise) aos conteúdos históricos (sempre que existirem), relacionados com a teoria atómica, presentes em alguns manuais escolares do terceiro ciclo do ensino básico⁷.

A escolha recaiu em sete manuais, quatro do oitavo ano e três do nono ano. Aos manuais dar-se-á a denominação de A, B, C, D, E, F e G. Os manuais A, B, C e D são referentes ao oitavo ano de escolaridade e os restantes ao nono.

⁷ Optámos por analisar manuais deste nível de ensino, sobretudo do oitavo ano de escolaridade, pois tal como foi referido no capítulo 1 e no presente capítulo, é nesta fase que ocorre o primeiro contacto entre os alunos e a hipótese atómica. Da forma como este assunto for abordado dependerá, e muito, o sucesso que estes terão na compreensão do mesmo, bem como a sua motivação para o prosseguimento e aprofundamento dos estudos neste domínio. A esta escolha não é alheio o facto de nos últimos anos de ensino a nossa prática pedagógica estar associada ao terceiro ciclo do ensino básico.

Para a concretização desta pequena incursão, recorremos a alguns pontos do trabalho desenvolvido por Leite (2002, pp.343-356), que fez uma análise da história apresentada nos manuais escolares. No entanto, o que nos interessa é “ver” que tensões são postas em jogo de modo a mobilizarem *suspense* e interesse.

No quadro seguinte estão descritos os parâmetros que guiaram a nossa incursão aos conteúdos históricos presentes nos manuais escolares.

Quadro 1 – Parâmetros considerados na a nossa incursão aos conteúdos históricos presentes em alguns dos manuais escolares dos oitavo e nono ano de escolaridade

Designação	Descrição
Referência ao conceito de átomo.	Tendo em consideração a ingenuidade e o raciocínio empírico característico do pensamento dos alunos desta faixa etária, aliado à abstracção que o conceito de átomo acarreta, pretendemos averiguar como é que este conceito é abordado pela primeira vez.
Apresentação de uma história em que os problemas ganham visibilidade.	Procuramos aferir se a história existente nos manuais escolares desenvolve alguma sensibilidade sobre o valor, poder e beleza da ciência.
Informações biográficas.	Pretendemos fazer a distinção entre os manuais que apresentam mera informação biográfica dos cientistas, como a data de nascimento e de morte, país natal e profissão, daqueles que apresentam elementos biográficos com valor pedagógico. Destes, saliente-se o enquadramento histórico e social que rodeava o cientista, bem como os interesses pela natureza ou tecnologia.
Apresentação clara do desenvolvimento conceptual.	Da História do átomo fazem parte vários avanços e retrocessos, assim como inúmeras controvérsias. Queremos aferir se a História que é apresentada nos manuais contempla estes aspectos, que consideramos essenciais para que os alunos possam compreender alguns aspectos relacionados com a natureza do conhecimento científico.

Apesar dos manuais seleccionados corresponderem a anos de escolaridade distintos, não pretendemos levar a cabo uma incursão diferenciada. Esta situação é possível, pois a abordagem histórica efectuada à teoria atómica é sensivelmente a mesma. Aquilo que as distingue (em ambos os anos de escolaridade é feita uma abordagem ao nível dos modelos atómicos, no entanto, no oitavo ano termina no modelo de Dalton, enquanto que no nono ano prossegue até ao modelo de Bohr), não é suficientemente relevante para que se tenham considerações em separado.

De um modo geral, consideramos que a história que encontramos sobre a teoria atômica é descritiva e pouco estimulante. A ausência de polêmicas que marcaram a história do átomo (em especial as que se geraram em torno da concepção atômica de Demócrito e da problemática que se estabeleceu entre Dalton e Gay-Lussac em redor da constituição química da água) é um dos aspectos que assinalamos como deficitários na história dos manuais escolares.

Após o sucinto estudo, e tendo em conta os parâmetros considerados, chegámos às seguintes conclusões:

- Na maioria dos manuais não vislumbramos a intenção de realçar que a imaginação científica faz parte do desenvolvimento do conhecimento científico. A primeira abordagem ao conceito de átomo é absolutamente desprovida de valor pedagógico. Não é salientado porque se gerou tanta polémica em redor deste conceito, nem tão pouco é dada uma razão para o seu forte poder explicativo e que contribuiu para a sua emergência no domínio da imaginação. Tendo em consideração a ingenuidade e o raciocínio empírico característico do pensamento dos alunos desta faixa etária, entendemos que estes aspectos devem ser realçados para que a ideia de átomo adquira significado nas suas mentes. Os excertos que se seguem (que correspondem quase à totalidade da História acerca do átomo que encontramos nestes manuais), retirados dos manuais A e C, são apenas um exemplo aquilo que mencionámos.

Manual A:

Já há mais de dois mil anos, os filósofos gregos pensaram que a matéria era formada por corpúsculos a que deram o nome de átomos. A palavra átomo provém do grego *atomus*, que significa indivisível.

Manual C:

Demócrito, filósofo grego, sugere que toda a matéria é “feita” de partículas muito pequenas e indivisíveis, a que chama **átomos**.

A polémica que se gerou entre Dalton e Gay-Lussac em torno da composição química da água poderia ser um dos episódios da história da ciência a explorar nos manuais escolares. A exploração adequada desta polémica poderia contribuir para

diminuir a angústia que muitos alunos sentem ao tentarem acertar, pela primeira vez, equações químicas.

- A matéria aparece exposta sem que os problemas que estiveram associados a avanços científicos no domínio da teoria atômica ganhem visibilidade. Desta forma, este tipo de História não contribui para desenvolver nos alunos alguma sensibilidade sobre o valor da ciência. Consideramos que a apresentação das problemáticas que estiveram na gênese do atomismo e dos avanços relacionados com a teoria atômica poderá promover essa sensibilidade. A História que encontramos em alguns manuais parece ser imune às interrogações e dúvidas com as quais a ciência se foi e vai confrontando. Por exemplo, o átomo de Dalton é apresentado, em alguns manuais, com uma continuação do átomo de Demócrito. Não é realçado que o átomo de Dalton é já resultado de algumas evidências experimentais, ao contrário do átomo de Demócrito. Veja-se, como exemplo, a seguinte passagem do manual B:

John Dalton (1766-1844), cientista inglês, recuperou a teoria de Demócrito e voltou a explorar o modelo atômico, o que possibilitou ao médico inglês Robert Brown, nos princípios do século XIX, observar não só a natureza corpuscular da matéria, mas também a sua incessante agitação.

- No que diz respeito à informação biográfica, o manual H é o único que apresenta alguns elementos biográficos com valor pedagógico, nomeadamente, os interesses de alguns cientistas pela natureza ou tecnologia. Os restantes manuais apresentam mera informação biográfica dos cientistas, como a data de nascimento e de morte, país natal e profissão.

- A forma como o assunto é abordado nos vários manuais escolares não possibilita que os alunos possam compreender importantes aspectos relacionados com a natureza do conhecimento científico. Apesar de todos apresentarem a evolução dos modelos atômicos, não fazem qualquer referência às controvérsias que foram surgindo. A construção do conhecimento é descrita como uma acumulação de informação legada de um cientista para outro. Não se dão a conhecer as inúmeras controvérsias que fazem parte da História do átomo e que mostram a desconfiança e a discórdia manifestada por diversos cientistas em relação a trabalhos anteriores. Este tipo de História dá a entender

que tudo corre sempre bem, basta para isso prosseguir umas quantas etapas exigidas pela metodologia científica e o conhecimento surge. Pensamos que seria de grande interesse e utilidade pedagógica incluir nos manuais escolares episódios representativos das adversidades e peripécias ocorridas durante os estudos dos cientistas.

As evidências parecem ser suficientes para justificar a nossa insatisfação com a utilização deste tipo de História nos manuais escolares. No entanto, compreendemos que as orientações programáticas empurrem os autores dos manuais escolares para a utilização de uma História descritiva.

O objectivo da presente dissertação não assenta na construção de materiais, com valor pedagógico do ponto de vista histórico, para manuais escolares. Ainda assim, deixamos como sugestão, a incluir nos manuais escolares dos oitavo e nono anos de escolaridade aquando da primeira abordagem ao atomismo, um excerto retirado do livro de Café (2002):

- (...) Como tantas outras na História da Ciência, as ideias erradas conduziam a caminhos novos.
- Compreendo – disse o Zé. – Uma outra coisa, ainda. A Ciência costuma ser associada à disciplina, ao rigor e à repetição exaustiva de determinados métodos tidos como certos. Agora eu pergunto: qual é o papel que a imaginação tem na Ciência, afinal?
- Um papel enorme, meu amigo, um papel enorme! – respondeu o Professor. – Veja o caso do átomo, por exemplo.
- Que tem o átomo de tão especial?
- A história do átomo é a história de uma das mais belas vitórias dos homens. Quer-nos até parecer que em todo o desenrolar das actividades humanas nunca a Ciência e a Poesia estiveram ligadas tão intimamente como neste caso.
- A Ciência e a Poesia de mãos dadas?! A ideia parece aliciante! – exclamou o Zé, agitando-se um pouco na cadeira com visível excitação.
- A descoberta do átomo não é apenas bela pelo seu significado prático, por se prestar a melhorar profundamente a vida dos homens. É bela também como conquista do espírito, pelo extraordinário poder de imaginação que revela. (pp. 62, 63)

Manuais utilizados:

- A – Cavaleiro, M. Neli G. C. & Beleza M. Domingas (2003). *FQ Sustentabilidade na Terra*. Porto: Edições Asa.
- B – Figueiredo, Teresa Tasso de (2003). *EUREKA! CFQ Sustentabilidade na Terra*. Lisboa: Texto Editora.
- C – Mendonça, Lucinda S. et al. (2004). *TERRA MÃE CFQ – Sustentabilidade na Terra*. Lisboa: Texto Editora.
- D – Pires, Isabel & Ribeiro, Sandra (2003). *Mundos – Sustentabilidade na Terra*. Carnaxide: Constância Editores.
- E – Maciel, Noémia & Miranda, Ana (2004). *Eu e o Planeta Azul – Viver melhor na Terra*. Porto: Porto Editora.
- F – Mendonça, Lucinda S. et al. (2004). *TERRA MÃE CFQ – Viver Melhor na Terra*. Lisboa: Texto Editora.
- G – Morgado, Joaquim & Morgado, Glória L. (2004). *Ser com Saber*. Lisboa: Plátano Editora.

Capítulo 4 – O suporte multimédia da «Aventura do Átomo»

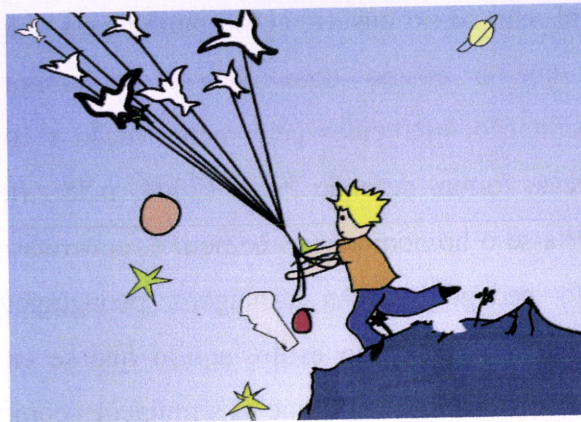


Figura 4: Imagem relativa à introdução do suporte multimédia «Aventura do Átomo»

4.1. Pertinência da aplicação multimédia

Vários são os esforços dos investigadores em Educação em Física, no sentido de criarem e utilizarem métodos que contribuam para motivar os alunos a estudar Física. Como ficou registado nos capítulos anteriores, a História e Filosofia das Ciências pode contribuir para a mudança de atitude dos estudantes face ao estudo desta disciplina. Tendo em conta que as sociedades desenvolvidas assentam cada vez mais na Ciência e Tecnologia (C&T) e que, actualmente, os programas curriculares do 3º ciclo e do ensino secundário pressupõem que o ensinamento das ciências seja sustentado através da relação entre a Ciência, a Sociedade e a Tecnologia (CTS), propusemo-nos associar harmoniosamente a nossa «Aventura do Átomo» (alicerçada na utilização pedagógica da História da Ciência) e a Tecnologia. Desta simbiótica associação resultou uma aplicação multimédia que visa, de um modo mais apelativo, facilitar a aprendizagem de alguns aspectos relacionados com a teoria atómica, por parte dos alunos do ensino básico, secundário e, até mesmo, do superior. Apoiados numa matriz histórico-filosófica, procurámos desenvolver um produto que fosse diferente do que actualmente encontramos sobre a teoria atómica na Internet ou em *software* educativo.

Presentemente e através das novas tecnologias de comunicação que estão disponíveis no mercado, assistimos a uma revolução global nas comunicações entre os povos. Depois destas tecnologias terem alcançado vários sectores da sociedade, a educação é uma das áreas que está sendo consideravelmente influenciada por esta onda tecnológica. Efectivamente, estamos a falar da introdução do computador na sala de

aula, com os seus programas interactivos e acesso aos recursos da *Internet*. O computador ligado à “teia mundial”, ou seja, à *Internet*, apresenta-se-nos como realidade incontornável, não só no ensino, como também na vida de todos nós. Paiva (2004, p.58) refere que o ensino com recurso ao computador tem todas as potencialidades de facilitação, oferecidas pela reconstrução e comunicação rápida de informação digital. Desta forma, defende Paiva (2004, p.58), fica destinado o que é rotina à máquina, liberta-se o homem para o homem e, concretamente, o professor e o aluno para a relação pedagógica. As vantagens pedagógicas da utilização do computador não se reduzem apenas ao estilo, aquilo que se ensina com recurso ao computador, merecendo aqui especial enfoque as simulações computacionais, acrescem valor à sua utilização em contexto educativo. Saliente-se, todavia, o toque de prudência que deve existir na utilização de recursos tecnológicos. Devemos estar conscientes que as tecnologias não são, por si só, a panaceia dos principais problemas e desafios que se colocam à educação. Como afirma Atinkson, referenciado por Paiva (2002, p.47), as Tecnologias de Informação e Comunicação não são antagonistas dos métodos tradicionais, mas antes, os dois se interpotenciam.

As Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), sendo o computador, com legitimidade, o seu expoente máximo, são hoje uma mais valia para professores e alunos. As potencialidades pedagógicas das TIC são inúmeras. Em linhas gerais, permitem seleccionar, recolher e organizar informação com registo de sons e imagens, possibilitam uma aprendizagem autónoma e o desenvolvimento das capacidades de análise e reflexão e facultam o acesso à informação em várias línguas. A escola não pode ter um papel passivo, devendo acompanhar as exigências de uma sociedade cada vez mais informatizada. Como refere Paiva (2002, p.7), uma escola que não recorra, ou melhor, que não integre os novos meios informáticos, corre o risco de se tornar obsoleta.

De acordo com Meleiro e Giordan (1999, p.18), no actual contexto sociocultural, influenciado pelas TIC, o analfabeto não é só aquele que não domina a leitura, a escrita e a oralidade (analfabetismo tradicional), mas também aquele que não detém os códigos que lhe permitam a utilização dos recursos informáticos. Os novos meios de informação e comunicação destinados à difusão e construção do conhecimento que estão a ser desenvolvidos têm como característica a capacidade de integrarem diversos meios em um único. Ao contrário de um livro, um meio estático capaz de servir de sustentáculo apenas as representações visuais, os novos meios articulam representações visuais

animadas, representações sonoras e até o próprio texto escrito pode ganhar movimento. Estes novos meios são frequentemente apelidados de multimédia, hipertexto e hipermédia. Segundo Meleiro e Giordan (1999, p.20), a conceitualização destes termos ainda é objecto de discussão. Estes afirmam que o hipertexto pode ser entendido como uma estrutura semântica na qual os textos estão associados por meio de ligações (*links*). Christensen et. al, mencionados por Fouché (1995, p.11), definem multimédia como o uso de múltiplos recursos *media* (música, voz, imagens, texto, animações e vídeos) que são controlados e/ou criados por um computador, defendendo que hipermédia pode ser visto como a combinação da multimédia com o hipertexto, onde as parcelas de informação representadas nos múltiplos recursos *media* estão conectados por *links* significativos. Consideramos, portanto, que dos três, o termo hipermédia é o mais abrangente, uma vez que aglutina os outros dois. Todavia, actualmente, o termo multimédia é o mais utilizado e adquire o significado de hipermédia.

Podemos tratar os sistemas hipermédia (junção de componentes hipertextuais e multimédia) como plataformas de alto valor cognitivo para construção de significados, pois possibilitam a simulação computacional através da transformação da tela do computador num “laboratório experimental”. De acordo com Meleiro e Giordan (1999, p.18), assistimos à produção em larga escala de sistemas hipermédia voltados para o ensino, disponibilizados na *Internet* ou em suporte CD-ROM/DVD. De facto, as ciências físico-químicas prestam-se à utilização deste tipo de recurso. Paiva (2005, p.6) salienta que já existem inúmeros estudos sobre aplicações de *software* educativo com os alunos, muitos deles em âmbito de teses de mestrado. Estes evidenciam os pontos fortes e fracos das aplicações mas, de um modo geral, de forma mais quantitativa ou mais qualitativa, tais estudos têm demonstrado a utilidade do *software* educativo em físico-química. Nunca uma “utilidade fundamentalista” mas uma “utilidade complementar” destes recursos digitais, face a outras estratégias de ensino-aprendizagem menos suportadas tecnologicamente.

Actualmente é imensa a diversidade de aplicações informáticas com diferentes funcionalidades, sendo que, muitas delas são passíveis de constituir recursos educacionais para a área da Física e da Química. Pretendemos, obviamente, que a nossa aplicação hipermédia se constitua num instrumento extremamente útil na abordagem a diversos conteúdos acerca da teoria atómica. Tendo em conta a natureza da temática escolhida para o desenvolvimento do nosso *software* educativo, não podemos deixar de realçar o papel de destaque que as simulações computacionais adquirem. Ao explorar

uma simulação computacional com o mínimo de interactividade e experimentação, o aluno toma sempre um papel mais activo na sua aprendizagem do que a partir da transmissão de conhecimentos efectuada pelo professor. Acrescente-se, ainda, que trabalhar com uma simulação computacional desperta geralmente entusiasmo no estudante, influenciando-o positivamente na sua motivação. Ao professor cabe-lhe o papel de facilitador e organizador do conhecimento perante o uso de simulações computacionais, pois estas não conseguem dar respostas a dúvidas ou curiosidades que possam surgir durante a exploração individual da simulação. As dúvidas que se levantam só poderão ser esclarecidas a partir da interacção professor-aluno. O professor, enquanto orientador das aprendizagens, deverá definir estratégias no sentido de ajudar a suprimir as dificuldades que possam surgir. Esta dinâmica do ensino das ciências está de acordo com a perspectiva construtivista. Um dos grandes desafios com que se depara o professor que, na sua prática educativa, recorre a simulações computacionais é o facto de, geralmente, estas não serem construídas de forma a poderem ser adaptadas aos diferentes ritmos de aprendizagem dos alunos. Deste modo, na aplicação de simulações computacionais o aluno explora e interage com o recurso, mas o professor torna-se indispensável para a orientação na compreensão das mesmas e na pesquisa de informação complementar.

Hegngi (1997, p.1) salienta que a utilização da *World Wide Web* (WWW) na educação à distância é hoje uma realidade. Consta-se, efectivamente, a emergência de plataformas multimédia *on-line* que visam facilitar a aprendizagem de conteúdos das mais variadas áreas. Como grande vantagem da sua utilização, Hegngi (1997, p.1) destaca a flexibilidade, ou seja, os conteúdos estão permanentemente disponíveis e acessíveis em qualquer parte do mundo. No âmbito da Física e da Química, os programas disponíveis na *Internet* são maioritariamente destinados ao ensino superior e em língua inglesa. Apesar de considerarmos que existem experiências bem conseguidas ao nível do ensino básico e secundário e em língua portuguesa (exemplo: portal de Ciência e Cultura Científica “Mocho” – www.mocho.pt), defendemos que continua a haver a necessidade de criar plataformas de natureza pedagógico-científica, em língua portuguesa e destinadas ao ensino básico, secundário e superior. A aplicação hipermédia que construímos, em conjunto com outras, fará parte de uma estrutura dedicada ao desenvolvimento, divulgação e dinamização de produtos multimédia/hipermédia na área da Física e da Química destinados a alunos e professores do ensino básico, secundário e superior e à população em geral. Esta estrutura de ensino

não formal, permitirá contribuir para o despertar da curiosidade e do interesse da população e dos alunos pelas novas aquisições da ciência e da tecnologia e para desenvolver uma formação científica adequada, mormente no âmbito da Física e da Química que capacite os mesmos para a abordagem de problemas, tanto específicos como multidisciplinares, de carácter científico e tecnológico.

4.2. Etapas subjacentes à concretização do projecto virtual

Construir uma aplicação multimédia acerca da hipótese atómica é uma tarefa complexa e morosa, sobretudo devido ao nível de abstracção que este tema acarreta, bem como à sua grande abrangência. No entanto, saliente-se que é também devido à sua abstracção e abrangência que se torna absolutamente fundamental criar *software* informático neste domínio. Pretendemos mostrar de uma forma entusiástica e apelativa como o átomo dos gregos, nascido da especulação filosófica, se “assumiu”, algumas dezenas de séculos mais tarde e baseado em fundamentos científicos provenientes de verificações experimentais, não só como o átomo da matéria, mas também como o da electricidade, da luz e da energia.

Tendo em conta a natureza da presente dissertação, a limitação de tempo a que estamos restringidos e a multiplicidade de áreas onde o atomismo se insere, seria de todo insustentável criar de uma só vez todos os conteúdos multimédia que deveriam constar num suporte informático sobre a teoria atómica. Desta forma, os conteúdos que desenvolvemos estão relacionados com os que abordámos na nossa narrativa histórica, mais concretamente, com a velha questão em torno da realidade dos átomos. Na aplicação, tal como na narrativa histórica, a explicação do movimento browniano adquire lugar de destaque. Apesar da parcela multimédia que construímos dar especial enfoque a uma restrita área da teoria atómica, quando projectámos o nosso *software*, pensámo-lo de uma forma abrangente, de modo a incluir, no futuro, outros assuntos relacionados com o atomismo. Como esta aplicação multimédia se insere no âmbito do Projecto MASTER¹, o futuro começa logo após a conclusão da presente dissertação,

¹ Projecto MASTER – Multimedia Advanced Science Teaching Resources. O objectivo geral do projecto é o de desenvolver, dinamizar e divulgar conteúdos e serviços multimédia de natureza científica na área da Física e da Química. Este projecto nasceu no âmbito do Mestrado em Física para o Ensino da Universidade de Évora incluído numa proposta de tema de dissertação de Mestrado. Os conteúdos desenvolvidos serão parte integrante de um projecto educacional que permita equacionar a educação e a aprendizagem passando de um ensino centrado no professor para uma aprendizagem construída pelo próprio aluno.

onde atingiremos as metas globais que traçámos.

Do projecto MASTER fazem parte inúmeras pessoas, entre os quais programadores e *virtual designers*. Tendo em consideração as nossas lacunas no que diz respeito à programação e ao *design* multimédia, fornecemos-lhes todas as indicações para que estes concretizassem o que pretendíamos. Em anexo, segue tudo aquilo que lhes disponibilizámos.

Estamos convencidos que este suporte multimédia permitirá tornar a aprendizagem de assuntos complexos, tais como o que desenvolvemos, numa aprendizagem mais interessante, divertida, interactiva e memorável. É necessário investir fortemente na produção de conteúdos de qualidade para todas as áreas disciplinares e promover a utilização pedagógica dos recursos existentes.

2ª Parte

Aventura do Átomo



Figura 5: A rosa do Príncipezinho de Saint-Exupéry

- “ – O essencial é invisível para os olhos – repetiu o príncipezinho, para nunca mais se esquecer.
- Foi o tempo que tu perdeste com a tua rosa que tornou a tua rosa tão importante.
 - Foi o tempo que eu perdi com a minha rosa... – repetiu o príncipezinho, para nunca mais se esquecer.”

Antoine de Saint-Exupéry, O Príncipezinho

Introdução

“Alice era uma menina com muita imaginação.

Uma manhã em que estava a estudar no campo com a professora... adormeceu! Ela tinha o hábito de fechar os olhos... assim podia deixar vagar a imaginação, liberta do controle dos mais velhos. E deixou-se levar...!

Acordou ao som de uma vozita! E viu um coelho muito estranho a correr.

- Espera-me, senhor Coelho! - gritou muito animada.”

Lewis Carroll, *Alice no País das Maravilhas*¹

Coelhos que falam!? Lagartas que dão conselhos!? Rei e a Rainha de Copas com exército de cartas!? Que mundo tão estranho encontrou Alice! Por certo que ninguém acredita que o mundo maravilhoso imaginado por Lewis Carroll² e descrito no seu extraordinário e famoso romance, *Alice no País das Maravilhas*, exista mesmo. Mas... e se um dia, numa galáxia distante, alguém o descobrisse, bem real e a palpitar de vida? Assim sucedeu com o nosso protagonista, o átomo, que, como destaca Rómulo de Carvalho (1975, p.8), nasceu na imaginação e, afinal, existia. A beleza e o valor, associados a este conceito, residem sobretudo no extraordinário poder de imaginação e de abstracção que o caracteriza.

O átomo, a maior criação de Leucipo e Demócrito, começou por ser uma hipótese, um utilitário instrumento lógico para tornar mais fácil a interpretação do Universo, no entanto e fazendo nossas as palavras de Carvalho (1975, p.7), acabou por ser um “objecto”, uma “coisa” que se pode dirigir, dominar, criar e destruir.

A conquista do átomo, alcançada depois de muitas “batalhas” comandadas por audaciosos cientistas e pensadores, onde muitos destes visionaram o que os seus olhos não viam e as suas mãos não conseguiam sentir, constitui, sem dúvida, um dos feitos mais extraordinários da história da humanidade. É parte desta admirável façanha que nos apraz contar, a história de um Rei “exilado” durante séculos e que um dia regressou e ocupou, definitivamente, o trono que por direito lhe pertencia.

¹ Excerto retirado de <http://www.terravista.pt/MeiaPraia/4811/histor31.html>

² Charles Lutwidge Dodgson (1832-1898), mais conhecido como Lewis Carroll, nasceu em Inglaterra, foi matemático, lógico, fotógrafo e romancista, sendo reconhecido como tal após o seu sucesso com "Alice no País das Maravilhas".

Assim, neste belo romance da ciência, veremos como o átomo dos gregos, nascido da especulação filosófica, se “assumiu”, algumas dezenas de séculos mais tarde e baseado em fundamentos científicos provenientes de verificações experimentais, como uma entidade pertencente ao domínio da realidade. A querela mantida entre atomistas e antiatomistas foi bastante acentuada ao longo dos séculos. Contudo, o século XIX trouxe consigo fortes argumentos, tanto da física como da química, a favor da realidade atômica. Alguns anos mais tarde, em 1905, a explicação de um *misterioso* fenómeno, o designado movimento browniano, contribuiria de forma decisiva para o *terminus* do conflito científico-filosófico que se registava em redor da teoria atômica, dando início a uma nova era – a era onde o átomo passou, em definitivo, a ser encarado como «um “objecto”, uma “coisa” que se pode dirigir, dominar, criar e destruir».

Num mundo em que a ciência e a tecnologia desempenham um papel de trivial importância, modelando as nossas vidas desde o contexto social ao económico-político, é com enorme apreensão que constatamos que as ciências e, em particular, a Física, são cada vez mais mantidas à distância, ou até mesmo ignoradas pelos jovens e pelo grande público. Segundo Allègre (2005, p.9), a razão principal deste afastamento é o facto de os cientistas, em nome duma especialização necessária e sempre exigente, se isolarem progressivamente, deixando a ciência abstrair-se da cultura geral. Convictos que no mundo de hoje não se pode falar de cultura se se mantiver a ciência à distância, eis que surgiu a necessidade de desenvolver uma narrativa que coloque em evidência a vida aventureira das ideias científicas. Com a nossa Aventura pretendemos colocar ao alcance de todos, de uma forma simples, clara e inequívoca a evolução de algumas teorias sobre a estrutura da matéria, assim como, realçar a importância da narrativa histórica na promoção, junto dos jovens, da aprendizagem e gosto pela Física.

*Qual será o Conceito que merece maior destaque no Universo da Física? Se, porventura, algum de nós tiver a veleidade ou a curiosidade de efectuar a leigos e especialistas esta questão, muito provavelmente, um dos que recolheria maior número de adeptos seria o átomo. E o átomo porquê? Átomo, atómico, atomismo, bomba atómica, energia atómica, atomizador, relógio atómico,..., a humanidade vive em permanente miscibilidade com o mundo do átomo. De resto, desde o senso comum, passando por físicos, químicos, astrónomos, biólogos, geólogos, este conceito flui abundantemente nos seus discursos. Perante assunto tão mediatizado, é de absoluta pertinência a escolha do átomo como o *Tesouro Encantado* da nossa Aventura. Aqui,*

vários *Indiana Jones* procuram bravamente na floresta do conhecimento pistas que os conduzam ao almejado tesouro. Convém também realçar o importantíssimo legado deixado pelos antecessores dos diversos *exploradores*, contribuindo cada um com uma parcela, maior ou menor consoante os casos, para o caminho traçado.

A abrangência do conceito de átomo é de tal ordem que não é possível, numa única *Aventura*, abordar todas as temáticas onde este tem papel de destaque. Sendo assim, como já foi mencionado, pretende-se dar relevo ao caminho traçado pelo átomo até à sua afirmação enquanto realidade física.

Alguns assuntos são difíceis de abordar sem o recurso à matemática, ainda assim, procurar-se-á, sempre que possível, reduzir ao máximo a sua utilização.

Visando uma primeira aproximação a determinados conteúdos e posterior aprofundamento dos mesmos, optar-se-á por uma organização em espiral. Consideramos que desta forma a presente narrativa adquire uma maior abrangência e um sentido que mais facilmente será apreendido por quem a ler.

Neste nosso percurso de construção da narrativa foram de extrema importância três obras, que percorrem o século XX:

- 1) *Taming the Atom, the Emergence of the Visible Microworld* – finais do século XX;
- 2) *História do Átomo* – meados do século XX;
- 3) *Les Atomes* – princípios do século XX.

1) *Taming the Atom, the Emergence of the Visible Microworld*:

É um exemplo do tipo de narrativas que gostaríamos de desenvolver. Aqui, o leitor é sujeito a um envolvente processo de “*taming*”, ou seja, de familiarização, com o átomo e com o mundo atómico. Ao lermos esta obra sentimos um imenso prazer, especialmente pela escrita apelativa, como já foi referido, que Baeyer utiliza. Pretendemos que a nossa narrativa também possa proporcionar o mesmo tipo de sentimento a quem a ler. Mas, se existe a narrativa que gostaríamos de escrever, porquê fazer o esforço para desenvolver uma narrativa?

O objectivo que nos guia é bem diferente do de Baeyer. Este autor pretende, com a sua narrativa, fazer divulgação científica em torno do conceito de átomo. Por sua vez,

a nossa narrativa tem como motor as dificuldades sentidas no ensino deste conceito e na ausência de significado que este tem para os alunos. A abordagem histórica efectuada por muitos manuais escolares não contribui significativamente para conferir valor pedagógico à ideia de átomo, daí a pertinência da elaboração de uma narrativa que possa servir como complemento à história apresentada nos manuais.

2) História do Átomo

Com a História do Átomo de Rómulo de Carvalho aprendemos a produzir uma escrita que mantenha o interesse. Já referimos como os títulos nele criam um apetite pelo que vem a seguir. A época em que foi escrito e o estilo do autor contrastam com *Taming the Atom*, como tentaremos ir ilustrando ao longo da narrativa. Embora não centremos a narrativa nos desenvolvimentos do século XX, é com os “olhos” do século XX que estamos a “ver” o átomo e para isso, a obra *Taming the Atom* foi decisiva.

3) *Les Atomes*

Esta obra fez história. Foi a partir daqui que houve conversão dos mais cépticos (Ostwald, por exemplo) relativamente à realidade atómica. Os átomos existem porque os podemos contar (como diria Perrin).

Para a elaboração da nossa narrativa também passámos por diversos artigos. Contactámos com alguns dos textos de Einstein relevantes para que o átomo passasse da imaginação à realidade. Destaque-se a sua tese de doutoramento e o seu primeiro artigo sobre o movimento browniano, concluídos ambos no miraboloso ano de 1905.

No decurso da «Aventura do Átomo» mostraremos como ao longo dos tempos o átomo esteve sempre rodeado por polémicas. Incidiremos, em particular, sobre duas:

- Controvérsia gerada entre Dalton e Gay-Lussac, bem patente na justificação que cada um avançou para a composição da água;
- Discussão em torno da realidade atómica no final do século XIX e início do século XX.

Daremos, também, alguma relevância a uma outra polémica e que está associada à concepção atomística da matéria protagonizada por Demócrito.

A «Aventura do Átomo» está dividida em quatro capítulos. Assim:

Capítulo 1 – A realidade atómica e o movimento browniano

Neste capítulo aguça-se o “apetite” para a leitura da restante narrativa. “Como sabemos que eles existem?”, é esta a questão que muitos fazem em relação à existência efectiva dos átomos. Actualmente, a humanidade tem ao seu dispor mecanismos tecnológicos capazes de nos fornecer imagens daquilo que se pensa serem átomos. Mas, nem sempre foi assim. De uma forma resumida, esclarece-se a importância que a explicação teórica do movimento browniano, protagonizada por Einstein e complementada pelas evidências empíricas compiladas por Perrin, teve para a emergência do átomo à esfera do real. Para além disso, reforça-se a pertinência que o processo de familiarização adquire no conhecimento que temos do outro ou de algo (neste caso do átomo).

Capítulo 2 – Teoria Atómica e Teoria Cinética

É o capítulo mais abrangente de todos eles. Não só porque abarca um longo período da história do átomo – desde os filósofos gregos até ao final do século XIX –, mas também, porque relaciona duas grandes teorias que estiveram e estão visceralmente interligadas: a Teoria Atómica e a Teoria Cinética. Neste capítulo será possível compreender alguns dos argumentos atomistas defendidos por químicos e físicos. Será ainda dado destaque a um número especial – o número N de Avogadro.

Capítulo 3 – O “louco” final do século XIX

O título do capítulo faz jus ao seu conteúdo. O final do século XIX foi de veras “louco”. Nesta altura, registou-se um turbilhão de novas evidências indirectas da existência de átomos, derivadas da química e da teoria dos gases, bem como outros desenvolvimentos, tais como as emergentes teorias do calor e da electricidade. A descoberta dos raios catódicos, dos raios X, do electrão e da radioactividade prenunciavam a afirmação atómica. Paralelamente, emergiu a convicção que para se

compreender sistemas onde se lida com uma gigantesca população, como os átomos e as moléculas, era necessário renunciar à ideia de descrever individualmente cada partícula, em benefício duma descrição estatística. As limitações de uma concepção rígida e determinística da natureza pareciam ser evidentes. Maxwell e Boltzmann foram os dois expoentes máximos desta nova forma de descrever a natureza. Estes estão associados à interpretação estatística da segunda lei da termodinâmica. Neste capítulo dar-se-á, ainda, destaque ao conflito científico-filosófico protagonizado por atomistas e antiatomistas no final do século XIX.

Capítulo 4 – A explicação do misterioso movimento e a afirmação do átomo enquanto entidade física

Depois do resumo apresentado no capítulo 1, aqui é possível conhecer-se, de uma forma mais profunda, a história do movimento browniano. A sua explicação teórica, a demonstração experimental e as consequências que daí resultaram serão exploradas neste capítulo.

Capítulo 1 – A realidade atômica e o movimento browniano

«Descrever as evoluções da dança destes deuses, as suas justaposições e os seus avanços, referir as que se alinharam e as que se opuseram, descrever tudo isto sem modelos visuais seria trabalhar em vão.»

Platão, *Timeu*¹

1.1. Átomos..., como sabemos que eles existem?



Figura 6: Átomo de mercúrio ²

A visão é, de entre todos os nossos sentidos, aquele que mais informações transmite à mente. Não admira, por isso, que a linha de inovação pela qual a ciência tem prosseguido privilegie a visão. Assim, instrumentos complexos penetram em domínios sensoriais muito para além de qualquer percepção biológica directa, capturando imagens minuciosas e de enorme interesse científico.

Direccionando a nossa atenção para o ensino da física, mais concretamente para aspectos relacionados com a teoria atômica, verificamos que os alunos, à priori, têm alguma relutância em aceitar a ideia de átomo, colocando, muitas vezes, a realidade atômica em causa. Esta dificuldade é perfeitamente legítima. Admite-se que os átomos são reais, mas do tipo de realidade que não pode confirmar-se apenas olhando à nossa volta. Façamos, então, uma viagem especial...

¹Citado por Philip Morrison e Phylis Morrison (2002, p.10)

²Imagem retirada do livro de Hans Christian von Baeyer, *Taming the Atom – the Emergence of the Visible Microworld* (2000, p. 1) O pequeno ponto no centro da imagem é um átomo de mercúrio carregado. As outras formas são meras reflexões dos componentes da “armadilha” utilizada para “capturar” átomos.

Dia primavera, os primeiros raios de Sol iluminam o átrio da escola. A azáfama é grande, aproxima-se a hora da entrada e ninguém quer chegar atrasado.

Trrriiiiiiiiiiiiiiiiiim.... soa o toque de entrada. João e Rita, alunos do 8º B, correm apressadamente para a sala de aula.

- *Despacha-te Rita, não quero chegar atrasado à aula de Físico-Química!*
- *Porque tens tanta pressa?*
- *O professor disse-me que nesta aula vamos falar sobre os átomos. Quero saber tudo sobre esta matéria! – respondeu o João com enorme entusiasmo.*

Entretanto, no decurso da aula...

- *Que têm em comum um livro, uma maçã, Marte, o oceano Atlântico, areia, o ar que respiramos? – perguntou o professor.*

Fez-se silêncio....

- *Ninguém sabe?... Vá lá, pensem um bocadinho. De certeza que já ouviram falar sobre este assunto através da imprensa, dos vossos amigos, ou até mesmo noutras disciplinas.*
- *Átomos... - respondeu o João com uma vozita trémula e pouco confiante.*
- *Muito bem João! Não tenhas medo de dizer isso com mais convicção. A resposta agora, no início do século XXI, é simples: todas as coisas são feitas de átomos.*
- *Tudo mesmo? - questionou a Rita, franzindo o sobrolho com ar extremamente desconfiado.*
- *Sim. – respondeu o professor com firmeza.*
- *E o que são átomos? Nunca os vi!*
- *Olha Rita – tornou o professor – a Natureza produziu uma vasta quantidade de átomos. A sua massa é minúscula e são tão pequenos, que a cabeça de um vulgar alfinete contém mais de 10 milhões de átomos!!!*
- *Uau!!! – exclamou o João com profunda admiração – Mas,..., professor,..., como sabemos que eles existem?*

A célebre frase “*uma imagem vale mais do que mil palavras*” aplica-se, indubitavelmente, a esta situação. A necessidade de uma prova visual, de um suporte objectivo, ou melhor, de uma imagem, constitui um elemento crucial para que qualquer um de nós aceite o mundo do infinitamente pequeno enquanto realidade física. Com o avanço da tecnologia, foi possível ao Homem observar aquilo que julga ser o átomo.

Utilizando os meios que a ciência actualmente dispõe, o professor não teria muita dificuldade em convencer os seus alunos da realidade atómica. Bastava, para isso, recorrer a “fotografias” de átomos individualizados ou de associações atómicas, obtidas utilizando microscópios com túnel de varrimento³. A concretização do mundo atómico através da imagem contribuiu, decisivamente, para a sua afirmação. No entanto, tratando-se de entidades minúsculas, a sua visualização directa jamais será possível, pelo que, legitimamente, se pode associar a eterna incerteza acerca do que se está a observar e formular a seguinte questão: Estas imagens correspondem, de facto, a átomos?

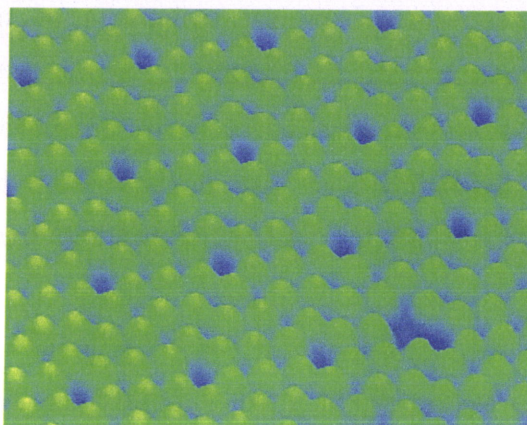


Figura 7: Imagem de átomos de silício na superfície de um cristal.⁴

O conhecimento actual aponta para que estas imagens, feitas por computador, correspondam ao mundo atómico. Assume-se, portanto, que a matéria é constituída por moléculas e átomos. Apesar das primeiras imagens de associações de átomos e de átomos individualizados só terem surgido na segunda metade do século XX, foi a partir de começos do século passado que o átomo se libertou, definitivamente,

³ De acordo com Asimov (2004, p.26), em 1936, o físico alemão Erwin Mueller (1911-1977) imaginou um dispositivo com capacidade para ampliar a ponta de uma agulha muito fina, de tal maneira que fosse possível tirar fotografias. A partir destas, os átomos, alinhados como pequenos pontos luminosos, seriam visíveis. O mesmo autor (1987, p.13) refere que a primeira vez que o Homem concretizou o sonho de “ver” os átomos foi em 1955, através de um microscópio de campo iónico. Actualmente usam-se microscópios de efeito de túnel. Segundo Baeyer (2000), a primeira fotografia de um átomo individualizado foi tirada na Universidade de Heidelberg, na Alemanha, e publicada em 1980. Daí até aos nossos dias, vários laboratórios já realizaram esta façanha.

⁴ Imagem retirada do site: <http://www.aip.org/history/exhibits/einstein/atoms.htm>. Esta imagem foi obtida utilizando a técnica de microscopia por efeito de túnel (STM - Scanning Tunneling Microscopy). A partir da década de oitenta do século XX, obtiveram-se inúmeras imagens utilizando a técnica STM. De acordo com Baeyer (2000, p.68), as imagens produzidas por STM e obtidas em computador, não são imagens no sentido convencional, porque dependem da corrente eléctrica, e não da luz, o que representa uma nova forma de ver. As cores das imagens são definidas pelo computador.

das amarras do imaginário e atravessou a fronteira para o mundo da realidade física, assumindo-se, segundo Allègre (2005, p.13), como o cerne da explicação “moderna” do mundo. A teoria corpuscular da matéria está hoje de tal forma interiorizada que se torna bastante difícil, para leigos e especialistas, imaginar o mundo demarcando-se da perspectiva atomista da matéria.

É desde muito cedo, na escola, que os alunos têm o primeiro contacto com o mundo do infinitamente pequeno. Aqui, a noção de átomo, apesar de abstracta, adquire a vertente física que actualmente a caracteriza. Para tal contribuem, de forma significativa, as “provas” visuais, mais concretamente, as “fotografias” de átomos individualizados ou de associações atómicas, assim como, e para níveis mais básicos de ensino, os modelos atómicos esféricos. Portanto, é a partir desta altura que se *inicia* nas crianças o processo de “*familiarização*” com o mundo atómico. Em Rómulo de Carvalho é o apelo à divisibilidade da matéria e às diversas actividades experimentais que se podem fazer neste âmbito (exemplo: dissolução do permanganato de potássio na água), que poderão facilitar a “*familiarização*” dos jovens estudantes com a ideia corpuscular da matéria e, obviamente, com a noção de átomo.

De acordo com Baeyer (2000, p. XV), desde crianças que nos acostumámos a pensar em átomos, mas associando-os a pequenas partículas microscópicas de matéria inerte e inanimada, que não conseguem mais do que reagir a estímulos externos, tal como os grãos de areia arrastados ao longo da praia pelo vento. No seu livro “*Taming The Atom – The Emergence of the Visible Microworld*”, Baeyer (que como físico teórico usa a matemática para descrever os átomos) relata, com extraordinária emoção, a sua visita ao National Institute of Standards and Technology do Colorado, onde, e apesar de estar familiarizado com reproduções de imagens atómicas em literatura técnica, viu pela primeira vez, ao vivo, um átomo isolado. O seguinte excerto é representativo da emoção que sentiu:

The first time I saw an atom, it blinked – it took me by surprise, winking like some living thing.
(p.XV)

A experiência que presenciou (o átomo de mercúrio a cintilar, aparecendo e desaparecendo, num intervalo de alguns segundos) funciona, segundo o mesmo, como uma importante questão a relembrar – os átomos são sistemas dinâmicos activos,

capazes das mais complexas transformações e convulsões internas e não são pequenas porções imutáveis, tal como os antigos tinham imaginado e algumas imagens e/ou modelos o possam sugerir.

1.2. Taming the Atom - “Estar preso” ao átomo

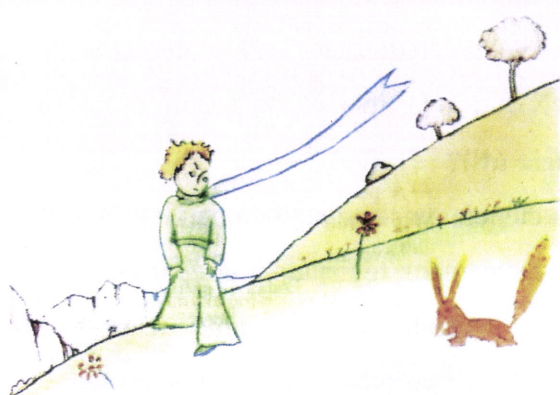


Figura 8: O Príncipezinho e a raposa ⁵

“Taming is a thing that is too often neglected. It means to establish bonds” ⁶

“ – Não – disse o príncipezinho. – Ando à procura de amigos. O que é que “estar preso” quer dizer?

– É uma coisa que toda a gente se esqueceu – disse a raposa. – Quer dizer que se está ligado a alguém, que se criaram laços com alguém” ⁷

Este excerto, escrito em inglês e português, da maravilhosa fábula de Antoine de Saint-Exupéry, “O Príncipezinho”, permite-nos reflectir sobre o que Baeyer (2000, p. XX) apelida de processo de familiarização. Segundo o mesmo (2000, p. XXI), este processo conduz ao conhecimento, pois só após estarmos familiarizados com uma coisa é que a podemos compreender. A familiarização (que se traduz, neste caso particular, pelas expressões “estar preso” ou “*taming*”) é um processo longo e moroso, sendo que, durante o mesmo se estabelecem laços profundos, determinantes na compreensão de algo.

Para aqueles alunos do 8º ano, que não sabiam o que eram átomos, que nunca os tinham visto e se interrogavam acerca da sua existência, começou, a partir daquele dia primaveril, o processo de familiarização com o mundo do infinitamente pequeno. É evidente que se tratou apenas do início, uma vez que estes jovens estudantes terão um longo percurso a efectuar para que de facto “estejam presos” ao átomo e compreendam o valor, o poder e a beleza deste conceito científico.

⁵ Imagem retirada do livro de Antoine de Saint-Exupéry (p.67), *O Príncipezinho*. (versão portuguesa)

⁶ Excerto retirado do livro de Hans Christian von Baeyer (p. XX), *Taming the Atom, the Emergence of the Visible Microworld*

⁷ Excerto retirado do livro de Antoine de Saint-Exupéry (p. 67), *O Príncipezinho*. (versão portuguesa)

Na vida, tal como na ciência, a familiarização desempenha um papel crucial rumo ao conhecimento que temos de alguém ou de algo. Mas, e se o outro que pretendemos tornar familiar, e assim entendê-lo de uma forma mais profunda, não estiver fisicamente presente, ou até mesmo, se não tivermos a certeza que de facto existe? Naturalmente, teremos maior dificuldade em compreendê-lo e, em última análise, em aceitá-lo como realidade. Quando o aluno, referindo-se aos átomos, interroga o professor “..., **como sabemos que eles existem?**”, confronta-o, por outras palavras, instintivamente e sem o saber, com a velha questão, muito debatida por Filósofos, Físicos e Químicos durante o século XIX e princípio do século XX – **átomos são fisicamente reais, ou apenas uma ideia útil?**

Ao contrário do que sucede actualmente, a ciência da segunda metade do século XIX e início do século XX (apesar dos estrondosos avanços registados na época) não dispunha de instrumentos científico-tecnológicos capazes de dar uma resposta indubitável acerca da existência física dos átomos. Como refere Asimov (2004, p.23), nessa altura, por melhor que funcionasse a teoria atómica, por muito engenhosos que fossem os seus aperfeiçoamentos e por mais que ela apontasse o rumo para novas descobertas, havia um facto que condicionava a sua aceitação e que não podia ser ignorado ou negligenciado: ninguém era capaz de ver os átomos ou de os detectar, fosse de que modo fosse. Segundo o mesmo autor (2004, p.23), todas as provas a favor da existência de átomos eram de natureza indirecta. Inferia-se a sua existência a partir de determinados factos, deduzia-se que os átomos existiam a partir desta ou daquela observação, no entanto, todas essas inferências e deduções podiam não corresponder à verdade. Para Asimov (2004, p.23), construíra-se com a teoria atómica um esquema que funcionava, mas que podia não passar dum simples modelo de algo muito mais complexo. Como tal, a dúvida permanecia – **a matéria é realmente feita de átomos ou apenas se comporta como se fosse?**

A resposta, teórica, é certo, mas todavia inequívoca e absolutamente determinante, surgiria, em 1905, pela mão do então jovem físico-matemático de 26 anos, Albert Einstein, ao apresentar, como refere Asimov (2004, p.26), um conjunto de equações matemáticas que descreviam o movimento errático de pequenas partículas macroscópicas suspensas em líquidos em repouso – **movimento browniano**. Einstein, crente que a matéria era constituída por átomos, explicou esse movimento como

consequência dos choques entre as pequenas partículas macroscópicas (grãos de pólen, por exemplo) e as moléculas constituintes do líquido (água, por exemplo) em repouso.

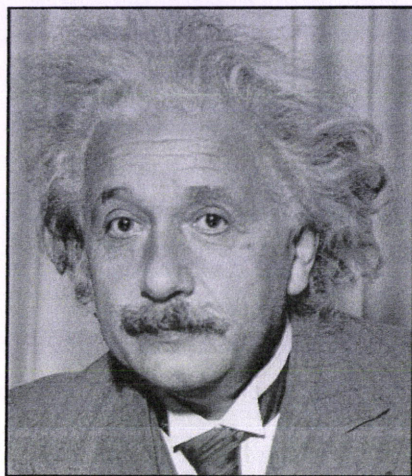


Figura 9: Albert Einstein (1879-1955) ⁸

Em 1908, o físico francês Jean Perrin fez exaustivas observações quantitativas das trajetórias de partículas de diferentes dimensões suspensas em líquidos em repouso. Este, confrontando as equações de Einstein com as suas observações experimentais, conseguiu determinar o número de Avogadro. Uma vez conhecido o número de Avogadro, foi possível calcular a dimensão dos átomos e das moléculas.

O monumental trabalho de Perrin (publicado em 1913) tratou-se, de facto, e segundo Asimov (2004, p.26), daquilo que mais se aproximou duma observação directa de átomos. Apesar destes não poderem ser visualizados, era possível, pelo menos, observar os efeitos das suas colisões e calcular, a partir de dados empíricos, as respectivas dimensões. Asimov refere (2004, p.26) que os átomos, segundo os cálculos de Perrin, tinham um diâmetro correspondente a cerca da centésima milionésima parte dum centímetro. Por outras palavras: uma fileira com 100 milhões de átomos colocados lado a lado teria um centímetro de comprimento. A resposta encontrada foi de tal modo esclarecedora para a comunidade científica que, até os cientistas mais reticentes tiveram de *dar o braço a torcer* e aceitar que a matéria era realmente constituída por átomos.

⁸ Imagem retirada do site: http://www.physics.uiowa.edu/adventure/fall_2005/oct_15-05.html



Figura 10: Jean Perrin (1870-1942)⁹

A explicação do movimento browniano constitui um marco na história da ciência, pois a partir daqui, o Homem começou, definitivamente, a “*estar preso*” aos átomos. Parafraseando Baeyer (2000, p. XXI), a familiaridade ajuda a converter estranhos em conhecidos, conhecidos em amigos, um amigo particular em família, logo, “*estando preso*” aos átomos (“by taming the atoms”), podemos fazer com que eles nos sejam extremamente familiares e assim começar a entendê-los de uma forma profunda.

Que tem então de comum o fascínio sentido por Baeyer ao ver o átomo de mercúrio cintilando como uma “coisa” viva, o entusiasmo sentido pelo jovem estudante de física no seu primeiro “contacto” com o átomo e a aceitação, por parte da comunidade científica, dos átomos enquanto entidades físicas? A resposta, essa, remetemo-la para Saint-Exupéry:



“The little prince understood the value of patience, for on his asteroid there grew a single rose that he had carefully tended and nurtured – that he had tamed. (p. XX)”¹¹

Figura 11: O Príncipezinho no asteróide¹⁰

⁹ Imagem retirada do site: <http://www.ibpc.fr/History.htm>

¹⁰ Imagem retirada do livro de Antoine de Saint-Exupéry (p.17), *O Príncipezinho*

¹¹ Excerto do livro *O Príncipezinho*, retirado do livro de Hans Christian von Baeyer (p.XX) – Taming the Atom, the Emergence of the Visible Microworld

As três situações correspondem, na prática, ao início de processos específicos de familiarização, cujo sucesso, estará, nos dois primeiros casos, e esteve, no último, marcado pela dedicação (diferenciada em cada situação) prestada à nossa *rosa* – o *átomo*. Em termos gerais, o conhecimento que temos do *outro* (pessoa, conceito, objecto,...) será sempre mais profundo e completo se a relação estabelecida for permanentemente *alimentada, nutrida* e repleta de muita perseverança, paciência e dedicação.

Capítulo 2 – Teoria Atómica e Teoria Cinética

2.1. Almas Gémeas

O contributo dado pela teoria atómica não se circunscreve apenas à interpretação de factos fundamentais em Química, assume-se também como instrumento basilar na edificação de teorias físicas. Se admitirmos a hipótese atómica, é possível prever as propriedades físicas dos corpos a partir do conhecimento da sua estrutura atómica ou molecular. Deste modo, por exemplo, as propriedades dos gases podem ser explicadas supondo-os constituídos por um número enorme de átomos ou de moléculas, animados de um movimento rápido e incessante.

Decerto que a grande maioria das pessoas já ouviu, nem que tenha sido apenas por uma vez, a expressão – *Por detrás de um grande Homem, há sempre uma grande Mulher*. Mas..., o que tem a ver esta expressão com a nossa aventura do átomo? Nada? Pouco? Muito? Pois bem, decifremos o enigma...

O triunfo da Teoria Atómica nunca teria sido possível, se a esta não estivesse associada a Teoria Cinética. O atomismo emancipou-se do seu carácter hipotético e atingiu o *glamour* da fama em grande medida devido ao extraordinário legado deixado pela sua alma gémea – a Teoria Cinética. Sem o contributo desta, o caminho a traçar pelo átomo rumo à sua aceitação enquanto realidade efectiva teria sido um eterno labirinto.

2.2. Um começo: uma exaltação e muita polémica

«By convention there is sweet, by convention there is bitterness, by convention hot and cold, by convention colour; but in reality there are only atoms and void.»

Demócrito¹

De acordo com Carvalho (1975, p.18), podemos dizer que a história da teoria atómica da matéria teve o seu início na segunda metade do século V a.C., sendo os seus

¹Citado por Baeyer (2000, p.6)

heróis principais dois filósofos gregos, Leucipo (490-? a.C) e o seu discípulo Demócrito (460-370 a.C.)².



Figura 12: Retrato idealizado de Leucipo (490-? a.C.)³



Figura 13: Demócrito (460-370 a.C.)⁴

Atribui-se a Leucipo a essência da hipótese atômica e a Demócrito a elaboração de uma teoria completa acerca da perspectiva descontínuista da matéria. A esta, segundo salienta Baeyer (2000, p.3), nenhum império conseguiu rivalizar em poder e longevidade.

“Qual é a natureza da matéria?” Segundo Baeyer (2000, pp.4, 5), foi na procura de encontrar resposta a esta questão, formulada um século mais cedo pelo lendário Tales de Mileto, que Leucipo e Demócrito admitiram que a matéria deveria ser constituída por partículas indivisíveis chamadas átomos. É interessante verificar que a questão levantada por Tales permanece sempre actual e é tão antiga como a filosofia, tão universal como a curiosidade e tão fundamental como a linguagem. Tanto é colocada por uma criança de seis anos de idade – “Do que é que sou feito?” – como por físicos que utilizam instrumentos de pesquisa de biliões de euros.

Procurando responder à questão de Tales, Leucipo e Demócrito formularam a hipótese atômica, no entanto, não é sabido como chegaram até à mesma. De acordo com Baeyer (2000, p.6) é possível que Demócrito, como ilustre matemático que era, com

² Segundo Santos (1946, p.2), parece que já em 1000 a.C., filósofos hindus teriam pensado na impossibilidade de se levar a subdivisão da matéria tão longe quanto se pretendesse. No entanto, nada se conhece de concreto do que se pensou sobre o assunto desde essa data até à altura de Leucipo e Demócrito.

³ Imagem retirada do site: http://es.wikipedia.org/wiki/Leucipo_de_Mileto

⁴ Imagem retirada do site: <http://matematica.uni-bocconi.it/galeazzi/capitolo2.htm>

particular relevância na geometria, tenha conjecturado a hipótese atômica enquanto procurava soluções para resolver paradoxos matemáticos dos seus dias.

A maioria dos filósofos daquela época considerava que não fazia sentido supor a existência de pequenas partículas indivisíveis. Para eles era mais razoável imaginar que tudo podia ser dividido em fragmentos cada vez mais pequenos, num processo sem fim (note-se que, como salienta Santos (1946, p.2), este ponto de vista não foi defendido apenas por filósofos da antiguidade, mas também, por filósofos de grande categoria como Ostwald e Mach, que nasceram no século dezanove e morreram no século vinte). Segundo Asimov (2004, p.14), Leucipo foi a primeira pessoa que se supõe ter refletido de uma forma mais fundamentada acerca do problema da divisão da matéria. Este filósofo terá chegado à conclusão que o processo não podia continuar infinitamente, destacando que, ao fim de muitas subdivisões de uma porção de qualquer material, se obtinha um fragmento de matéria tão pequeno que não era possível dividi-lo em algo ainda mais pequeno. Asimov prossegue (2004, p.14), referindo que um homem mais novo, de seu nome Demócrito e aluno de Leucipo, aceitou e aprofundou a ideia de que existiam fragmentos de matéria tão pequenos que eram indivisíveis. Demócrito apelidou esses fragmentos de *átomos* (palavra grega que significa *indivisível*) e admitiu que a matéria consistia numa coleção de átomos (completamente impenetráveis), existindo espaço entre eles que não continha nada – o *vazio* (completamente penetrável).

No excerto introdutório deste sub-capítulo, as palavras atribuídas a Demócrito reflectem, no entender de Baeyer (2000, p.6), a essência da sua teoria atômica. No entanto, todo o arcaboço associado a esta teoria é bem mais amplo. Santos (1946), através de citações atribuídas a Demócrito, mostra-nos isso mesmo:

Qualquer pedaço de matéria como, por exemplo, a pedra dum templo, é constituído por um grande número de partículas separadas, extremamente pequenas, do mesmo modo que o templo está construído com pedras soltas. Estas partículas, unindo-se por todas as maneiras possíveis, em ordem e posição, dão origem a todos os corpos materiais, tal como as vinte e poucas letras do alfabeto dão origem a inúmeras palavras. Por isso, lhes dou o nome de átomos, isto é, indivisíveis. São tão pequenos que será logicamente impossível dividi-los em partes ainda mais pequenas.

Os átomos são infinitos em número e infinitamente variados na forma. Chocam entre si e os seus movimentos laterais e redemoinhos estão na origem dos mundos.

As variedades de todas as coisas dependem das variedades dos seus átomos, em número, dimensões e modo de agregação.

A alma é formada por átomos suaves, formosos e esféricos, tais como os de fogo. São os que têm maior mobilidade. Penetram nas pessoas e dos seus movimentos resultam os fenómenos da vida.

(pp.2, 3)

Estas palavras atribuem-se a Demócrito, no entanto, e como salienta Carvalho (1975, p.18), as doutrinas que defendeu foram recolhidas em livros de outros que lhe fizeram referência, assim como ao seu mestre Leucipo. Asimov (2004, p.14) refere que, apesar de Demócrito ter escrito cerca de sessenta livros, nos quais expôs as suas teorias, incluindo a sua concepção daquilo a que actualmente chamamos atomismo, as suas obras foram desaparecendo ao longo dos séculos e nenhuma chegou aos nossos dias. Associado ao facto de nesse tempo existirem poucos exemplares de qualquer obra (não havia imprensa, logo os livros eram copiados à mão), os livros de Demócrito não foram copiados muitas vezes, sobretudo devido à impopularidade (que durou bastante tempo) das suas teorias.

A teoria atómica elaborada por Demócrito representa, certamente, uma interpretação da realidade repleta de genialidade. No entanto, não passa de uma mera intuição, despojada de qualquer validação experimental, onde os átomos adquirem o papel de utilitários instrumentos lógicos. Ainda assim, e como menciona Santos (1946, pp.3, 4), o atomismo de Demócrito constituiu um ponto de partida para o estabelecimento das teorias atómicas da ciência moderna (designadamente na química, por Dalton, pois foram as descobertas nesta ciência que contribuíram para fazer reviver o atomismo de Demócrito). Apesar da ciência moderna se colocar ao lado de Demócrito, saliente-se que esta admite a existência de átomos, mas como resultado da observação e experimentação indispensáveis para o estabelecimento de qualquer teoria. Para Santos (1946, pp.3, 4), a verdadeira glória do atomismo de Demócrito reside na capacidade que demonstrou em interpretar um maior número de fenómenos do que qualquer outra teoria existente nos tempos clássicos.

2.3. As primeiras leis dos gases e a genialidade de Daniel Bernoulli

Durante perto de dois mil anos, mais concretamente, desde a génese do conceito de átomo, atribuído aos filósofos gregos Leucipo e Demócrito, que as ideias associadas

ao átomo apenas serviam como motivo de discussões sem que se assinalasse qualquer progresso. Uns aceitavam a existência do átomo (admitiam, tal como Demócrito o fez, que a matéria consistia numa coleção de átomos, existindo espaço entre eles que não continha nada – o *vazio*), outros consideravam-no uma ridícula fantasia. Contudo, de acordo com Carvalho (1975, p.29), em 1661, um dos defensores mais convictos da existência dos átomos, o investigador irlandês Robert Boyle, apresentou a primeira evidência experimental da existência de átomos. Verificou que um gás, a temperatura constante, encerrado num recipiente munido de um êmbolo sobre o qual se podem exercer pressões variadas, diminui de volume na mesma proporção em que a pressão aumenta. Esta relação mostra a proporção inversa entre a pressão e o volume de um gás, isto é, revela que o produto entre a pressão e o volume de um determinado gás mantém o valor constante. Se a pressão duplica, o volume passa a metade; se a pressão quadruplica, o volume passa à quarta parte do que era primitivamente, e assim, de modo semelhante, para outros valores de pressão. Inversamente, duplicando o volume, a pressão reduz-se para metade; se o volume quadruplica, a pressão passa à quarta parte do que era inicialmente, e assim, do mesmo modo, para outros valores de volume.



Figura 14: Robert Boyle (1627-1691) ⁵

A esta relação formalizada por Boyle atribuiu-se a designação de lei de Boyle ou lei de Boyle-Mariotte, tão familiar entre os estudantes do ensino secundário. Carvalho (1975, p.33) refere que o nome de Mariotte, que costuma vir associado ao de Boyle, é o do sacerdote francês Edmé Mariotte (1620-1684) que enunciou a mesma lei numa obra publicada em 1676, quinze anos depois de Boyle a ter enunciado. Segundo o mesmo

⁵ Imagem retirada do site: <http://www.chemheritage.org/about/about-nav6-boyle.html>

autor, não se sabe ao certo se o físico francês a descobriu por meio de experiências suas, sem ter conhecimento dos trabalhos de Boyle, ou se já os conhecia.

O estudo desta lei deu a Boyle a convicção de que a matéria deveria ser formada por átomos. Considerava que os intervalos entre os átomos tornar-se-iam maiores ou menores consoante a variação dos valores da pressão a que o gás estivesse sujeito.

Carvalho (1975, p.33) refere que, para Boyle, esta lei representava uma garantia de que os gases (assim como líquidos ou sólidos) eram formados por “átomos”. Seria, no seu entender, uma prova experimental de que os átomos eram entidades reais, o que conferia um carácter totalmente diferente à velha questão da hipótese atómica.

Boyle representa um marco na história da teoria atómica, contudo, seria necessário esperar mais 77 anos para que surgissem novos argumentos, apoiados na experiência e mais convincentes, a favor da teoria atómica e da sua alma gémea.

De acordo com Baeyer (2000, p.14), em 1738, onze anos após a morte de Newton, desponta o suíço Daniel Bernoulli⁶. Este utiliza os átomos para fazer previsões de cariz quantitativo de fenómenos observados, contribuindo decisivamente para o desenvolvimento da perspectiva descontinuista da matéria.



Figura 15: Daniel Bernoulli (1700-1782)⁷

Purrington (1997, p.77) afirma que Bernoulli foi um dos primeiros cientistas a dar uma interpretação cinética à lei de Boyle-Mariotte, ao admitir que esta poderia ser compreendida em função do movimento dos átomos constituintes do gás. A teoria

⁶Allègre (2005, p.199) refere que na família Bernoulli é preciso dar atenção ao nome próprio, porque o génio parece ter tido nela carácter genético.

⁷Imagem retirada do site: <http://www.fredsakademiet.dk/library/science/science7.htm>

cinética dos gases, desenvolvida no século XIX, representa o resultado supremo da sua linha de pensamento.

Com o intuito de compreender as propriedades básicas dos gases, Baeyer (2000, p.14) destaca que Bernoulli foi capaz de demonstrar experimentalmente os estudos efectuados por Boyle e Mariotte. Para tal, postulou que um gás era constituído por inúmeras partículas sólidas, bastante afastadas umas das outras e que raramente colidiam. Postulou também, que as partículas do gás se movimentavam em linhas rectas, excepto quando ressaltavam das paredes.

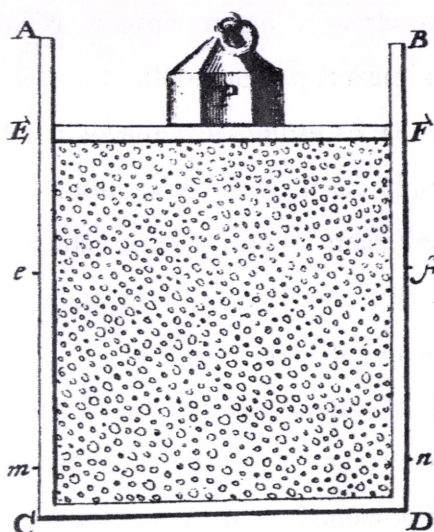


Figura 16: Ilustração elaborada por Bernoulli no seu livro *Hydrodynamica*, referente à sua *teoria cinética dos gases*.⁸

O movimento das partículas constituintes do gás representava um argumento chave na sua interpretação, o que, para a época, era uma visão absolutamente moderna e revolucionária. Baeyer (2000, p.14) descreve o modelo idealizado por Bernoulli, segundo o qual, mantendo inalterável a temperatura e o número de partículas (entenda-se, átomos ou moléculas) do gás, ao aumentar o volume do recipiente onde este se encontra, o número de partículas por unidade de superfície do recipiente e por unidade de tempo diminui, assim como o número de colisões das mesmas (o qual está, obviamente, associado à pressão). Por outro lado, se nas mesmas condições o volume do recipiente fosse reduzido, o número de partículas por unidade de superfície aumentaria, assim

⁸Imagem retirada do livro de Purrington (p.134), *Physics in the Nineteenth Century*

como o número de colisões. Bernoulli, à semelhança de Boyle e Mariotte, concluiu então que em determinadas condições, o volume e a pressão variavam na razão inversa.

O legado deixado pelo visionário cientista suíço não se ficou por aqui, estudou também o efeito da temperatura no comportamento de um gás. De acordo com Purrington (1997, p.133), Bernoulli compreendeu que a temperatura tinha que ser definida num sentido mais absoluto. Nas suas experiências verificou que aumentando a temperatura de um gás e mantendo o seu volume constante, as moléculas movimentar-se-iam mais rapidamente e, como consequência disso, aumentaria o número de colisões por unidade de tempo, ou seja, aumentaria a pressão. O *remate* final desta ideia seria dado, como veremos, alguns anos mais tarde por Gay-Lussac, que acabaria por deduzir a relação iniciada por Bernoulli.

Para Baeyer (2000, p.15), os estudos efectuados por Bernoulli representam, de forma clara, o primeiro exemplo da moderna física atómica teórica, onde, partindo de previsões quantitativas, se deduziam hipóteses matemáticas gerais. Para este cientista suíço do século XVIII, os átomos eram entendidos como pedaços reais de matéria (ao contrário da concepção de Demócrito que os introduziu como utilitários instrumentos lógicos), que se faziam sentir actuando colectivamente em enormes números (a trave mestra da interpretação microscópica da matéria). Lançou muitas e importantes pistas para a interpretação dos fenómenos, com base nos movimentos das partículas constituintes da matéria, contudo, a linha de investigação que abriu não foi suficiente para estabelecer a realidade dos átomos, nem a relação entre o “calor” (que ainda era visto por muitos como uma substância) e os movimentos dos possíveis átomos. Apesar de tudo, um século e meio depois, as ideias deste genial Homem da Ciência, associadas a fenómenos relacionados com o calor, iriam contribuir para o desenvolvimento da teoria atómica e da teoria cinética dos gases.

Qualquer estudante do ensino secundário conhece (ou deverá conhecer) a famosa lei de Gay-Lussac, relativa à dilatação dos gases quando sujeitos a um aquecimento. Todavia, a grande maioria desconhece o importantíssimo legado deixado por Bernoulli (testemunhado anteriormente) para a descoberta desta lei, estabelecida, de acordo com Carvalho (1975, p.50), pelo então jovem cientista francês de vinte e quatro anos, Joseph Louis Gay-Lussac.



Figura 17: Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850)⁹

A partir de experiências realizadas com diferentes gases, Gay-Lussac pretendia saber qual o efeito que a temperatura provocava na pressão e no volume de um gás. Para tal, fez variar o primeiro destes três factores, mantendo constante cada um dos outros em separado. Assim, deduziu que, mantendo constante a pressão do gás, o volume deste aumenta proporcionalmente ao aumento da temperatura; por sua vez, concluiu que a volume constante, a pressão do gás também aumenta na razão directa ao aumento da temperatura.

As leis de Boyle-Mariotte e de Gay-Lussac (sem descurar os contributos dados por Bernoulli para a formulação das mesmas) estão até aos dias de hoje imortalizadas através de uma relação matemática, fazendo, inclusive, parte dos programas do ensino secundário. A título de exemplo, vejamos como Carvalho (1975, pp.30, 31), recorrendo a *instrumentos* de cariz pedagógico, procura indicar um caminho que promova uma melhor interpretação por parte dos jovens estudantes (e não só!) da lei Boyle-Mariotte. Para tal, estabelece uma analogia entre os “átomos” de gás e moscas que voam dentro de um recinto limitado.

⁹Imagem retirada do site: http://fr.wikipedia.org/wiki/Louis_Joseph_Gay-Lussac

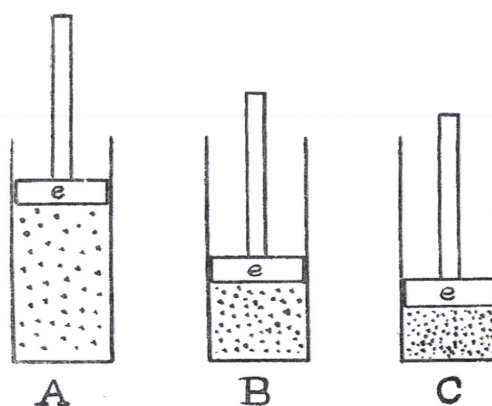


Figura 18: Esquema relativo à lei de Boyle-Mariotte ¹⁰

De acordo com este autor, os esquemas A, B e C representam um cilindro dotado de um êmbolo *e*. Quando se baixa o êmbolo, o gás contido no cilindro fica mais comprimido. Os “átomos” do gás, que estão em constante movimento, chocam, por isso, contra as paredes do cilindro como se fossem moscas esvoaçando num recinto apertado. Quando se baixa o êmbolo de A para B, o volume é reduzido para metade, o número de choques contra as paredes duplica, logo a pressão do gás duplica. Reduzindo o volume primitivo à terça parte (de A para C) a pressão triplica.

O que para nós parece, hoje, ser simples, no contexto da época era necessário imaginar a matéria constituída por corpúsculos, o que não era um dado à partida.

2.4. O contributo de Newton

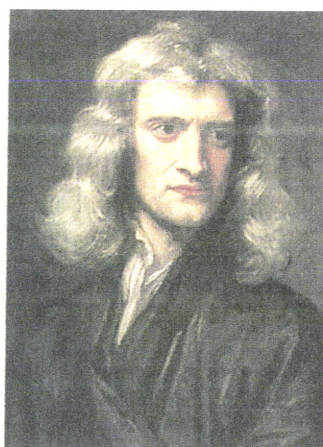


Figura 19: Isaac Newton (1642-1727) ¹¹

¹⁰ Imagem retirada do livro de Rómulo de Carvalho (1975, p.31), *História do átomo*

¹¹ Imagem retirada do site: <http://www.fredsakademiet.dk/library/science/science7.htm>

O contributo deixado por Newton na história da física e, conseqüentemente, na história da Humanidade, é algo de absolutamente extraordinário. O responsável pelo primeiro supremo êxito da física moderna – a teoria Newtoniana da mecânica – foi também peça chave no triunfo da teoria atômica. De acordo com Purrington (1997, p.114), apesar de Newton raramente mencionar os átomos e apenas uma pequena parte do seu trabalho depender da estrutura detalhada da matéria, a sua influência foi crucial na ascensão da filosofia corpuscular. Aos contributos dados por este brilhante físico no desenvolvimento da teoria atômica, não é alheio o facto, de na altura em que viveu, o atomismo já se ter livrado da sua associação com o ateísmo (que o perseguiu durante tanto tempo). Portanto, como refere Baeyer (2000, p.13), Newton pôde afirmar sem medo de represálias que *“the first matter must be attomes”*. O mesmo autor, através de um excerto de Newton, mostra-nos a forma clara e estranhamente (de acordo com Baeyer) persistente com que este expressava a sua crença na hipótese atômica:

Now, the smallest particles of matter may cohere by the strongest attractions, and compose bigger particles of weaker virtue; and many of these may cohere and compose bigger particles whose virtue is still weaker, and so on for divers successions, until the progression ends in the biggest particles on which the operations in chemistry, and the colours of natural bodies depend, and which by cohering compose bodies of a sensible magnitude. (p. 13)

Baeyer (2000, pp.13, 14) refere que esta passagem surpreende, não só pela sua riqueza nos detalhes acerca das propriedades dos átomos, mas também porque demonstra que, na mente de Newton, já residia a ideia de que estes seriam constituídos por partículas mais elementares, e estas, por suas vez, por outras ainda menores. Para além disso, sentiu que as forças entre as partículas deveriam aumentar de intensidade à medida que diminuísse o tamanho das mesmas, rumo a uma realidade cada vez menor e com maior grau de complexidade. Com o intuito de atestar a visão futurista de Newton, Baeyer (2000, p.14) estabelece uma comparação bastante lógica. Afirma que a física contemporânea admite que as forças entre as mais elementares partículas, as da base e verdadeiramente primitivas e indivisíveis, quarks e leptões, são, efectivamente, muito mais poderosas que as forças entre os átomos. Para Baeyer, Newton não previu os quarks, mas a sua intuição acerca da arquitectura da matéria eram válidos. Segundo Gonzáles (2003, pp.22, 23), este visionário físico, ao introduzir as forças de interacção como explicação da união dos corpúsculos, contribuiu para o abandono da crença, que

remontava desde Demócrito, de que os átomos se encontravam enlaçados mecanicamente. De acordo com a mesma fonte (2003, p. 23), as opiniões deste atomista convicto estão bem patentes no seu livro *Óptica*, escrito em 1674, no qual se pode verificar que subestimou a ideia introduzida por Descartes de que as partículas se desgastavam pelos contínuos choques que sofriam.

Baeyer (2000, p.13) afirma que Newton, apesar de não possuir provas experimentais directas que suportassem as suas hipóteses, preparou o terreno para aqueles que se seguiram. De acordo com o mesmo autor, a força da filosofia Newtoniana assentava nos seus dois métodos de descrição da natureza – a *dedução* e a *indução*. Por um lado, por meio da *dedução*, as hipóteses teóricas conduziam a previsões que podiam ser verificadas experimentalmente (exemplo: a relação estabelecida por Bernoulli entre o volume e a pressão, a partir da hipótese atómica). A *indução*, por outro lado, seguia na direcção contrária, partia de evidências empíricas particulares, a uma lei geral da natureza. Baeyer salienta, que a filosofia Newtoniana foi coroada com sucesso quando os dois caminhos convergiram nos mesmos resultados¹².

Excepção feita à teoria cinética de Bernoulli, durante o século XVIII, não se registaram significativos avanços no desenvolvimento da teoria atómica. Purrington (1997, p.115) afirma que, apesar da influência de Newton ser enorme e de se verificar uma aceitação generalizada da ideia subjacente à estrutura corpuscular da matéria, o atomismo não tinha fundamentação experimental. Esta foi, como destaca o autor supracitado, a principal razão para a *esterilidade* do atomismo durante este século. Pais (2004, p.105) vai até mais longe, afirmando ser concebível imaginar que um diálogo entre os antigos gregos e os filósofos de fins do século XVIII poderia tê-los levado facilmente a um acordo mútuo de que, em dois mil anos que os separavam, muito pouco havia mudado relativamente à compreensão da estrutura básica da matéria. A suportar a ideia deste autor está, como o próprio refere, a definição de átomo que consta da primeira edição da *Encyclopedia Britannica* (um dicionário de artes e ciências), concluída em 1771. De acordo com Pais, o termo *átomo*, escrito por William Smellie, homem recordado pela dedicação ao ensino, consistia no seguinte:

¹² Há, contudo, filósofos que afirmam hoje que a indução de Newton é especial: utiliza os factos experimentais para deduzir a partir de uma hipótese inicial não explícita (N. Cartwright, 1999)

Átomo. Em filosofia, uma partícula de matéria tão diminuta que não admite divisão. Os átomos são a mínima *naturae* (os mais pequenos corpos) e são concebidos como os primeiros princípios ou as partes componentes de qualquer grandeza física. (p.105)

2.5. Dalton e o nascimento da química moderna

No início do século XIX a aproximação indutiva ao estudo dos átomos foi, como refere Baeyer (2000, p.15), seguida pelos químicos. De acordo com Purrington (2000, p.118), a forma como estes abordaram o atomismo estava directamente relacionada com a forte influência da perspectiva atomista de Newton. Na verdade, o modelo atómico estático usado por Boyle e Newton contribuiu para que os químicos não colocassem ênfase no movimento dos átomos, mas sim nas suas combinações e separações. Estes desenvolveram a sua própria teoria do átomo da química, com escassa relação com a concepção atómica de Bernoulli, que constitui um dos alicerces da teoria do átomo da física. Refira-se que, como destaca Baeyer (2000, p.16), Bernoulli, ao contrário dos químicos, focou a sua atenção no movimento dos átomos, sem referência aos seus pesos e modos de interacção. Baeyer (2000, p.16) estabelece, mais uma vez e com o requinte que se lhe reconhece, uma esclarecedora analogia. Para este autor, da mesma forma que os caçadores seguem silenciosamente a sua presa nas ervas altas de diferentes direcções, os físicos e químicos *atacam* o problema da estrutura atómica à sua maneira e por caminhos separados.

De acordo com Purrington (1997, p.118), é ao inglês John Dalton que se atribui o crédito de ter estabelecido a química moderna nos princípios do atomismo.



Figura 20: John Dalton (1766-1844) ¹³

¹³ Imagem retirada do site: <http://www.ieap.uni-kiel.de/plasma/ag-piel/vorl/kap1/kap1.html>

O acontecimento que marca o nascimento da química moderna é a publicação, em 1808, de uma obra de Dalton intitulada *New System of Chemical Philosophy* (Novo Sistema de Filosofia Química), na qual o seu autor procurava mostrar que tudo fazia sentido à luz do atomismo. Para tal, reuniu nesse livro todas as provas que conseguira recolher e que sustentavam as suas convicções. Segundo Asimov (2004, p.21), foi Dalton quem usou a expressão átomos, regressando deliberadamente ao velho termo como homenagem a Demócrito. No entanto, a hipótese atômica dos tempos modernos, cuja paternidade fora assumida por Dalton, já pouco tinha a ver com a velha teoria dos gregos, sobretudo porque, enquanto Demócrito formulara apenas uma hipótese; Dalton apelava já a uma certa evidência empírica. Como escrevem B. B. Vincent e I. Stengers (1993):

O átomo daltoniano não é um herdeiro dos átomos antigos nem dos corpúsculos newtonianos. É inventado, depois explorados num outro contexto. (p.150)

Dalton retirou o átomo do domínio da especulação filosófica e *levou-o* para o laboratório. Este astucioso químico inglês dirigiu a sua atenção para o estudo dos fenómenos químicos (sobretudo experiências com gases), reflectindo acerca da maneira como deveriam decorrer se, efectivamente, as substâncias fossem constituídas por átomos. De acordo com Carvalho (1975, p.39), a hipótese atômica de Dalton poderia resumir-se do seguinte modo:

- 1.º – todos os elementos são formados por pequenas partículas chamadas átomos;
- 2.º – os átomos do mesmo elemento são todos iguais entre si. Têm todos, portanto, o mesmo peso. A cada elemento corresponderão átomos de um certo peso. Os átomos de qualquer outro elemento já terão pesos diferentes;
- 3.º – quando os elementos se combinam uns com os outros, são os seus átomos que se combinam entre si. Estas combinações serão sempre efectuadas em proporções muito simples: 1 átomo de um com 1 átomo do outro; 1 do primeiro com 2 do segundo; 2 do primeiro com 1 do segundo; 3 do primeiro com 2 do segundo, etc.¹⁴

¹⁴ Esta regra está em conformidade com a *lei das proporções múltiplas*, na qual Dalton baseou a sua química. De acordo com Pais (2004, p. 107), esta lei consistia no seguinte: se existe mais de um composto formado por dois elementos, então as razões dos pesos (massas) de um elemento que se combinam com uma quantidade fixa de outro são inteiros simples.

Na elaboração da sua moderna teoria atômica, Dalton beneficiou do trabalho realizado por alguns dos seus antecessores. Um dos exemplos mais claros prende-se com a noção de elemento. De acordo com Gonçalves (2003), em 1661, Boyle, no seu livro *The Skeptical Chemist* (O Químico Céptico), estabeleceu definitivamente uma rotura com a doutrina dos quatro (ou cinco) elementos¹⁵, propondo uma nova definição de elemento químico:

(...) Elementos são... corpos simples e Primitivos; que não sendo feitos de quaisquer outros corpos, nem uns dos outros, são ingredientes dos quais aqueles que são chamados Corpos perfeitamente mistos são directamente compostos e nos quais eles são por fim resolvidos. (p.16)

Asimov (2004, p.18) acrescenta que Boyle considerava inútil tentar adivinhar quais as substâncias básicas constituintes do mundo, admitindo que a sua identificação só poderia ser possível através de experiências. Para este, qualquer substância que não pudesse ser decomposta em substâncias mais simples por meio de manipulações químicas, era um elemento, por sua vez, qualquer substância que pudesse ser reduzida a componentes mais simples, não era um elemento. Apesar de ser um princípio incontroverso, era, no entanto, difícil de pôr em prática. Ainda assim, Asimov (2004, p.18) salienta que, a partir da época de Boyle e ao longo de três séculos, os químicos esforçaram-se por identificar substâncias que pudessem ser classificadas como elementos. Segundo o mesmo autor, ouro, prata, cobre, ferro, entre muitas outras¹⁶, são exemplos de substâncias conhecidas que foram classificadas como elementos, correspondendo a cada um, um tipo específico de átomos. Na altura em que Dalton publicou a sua teoria, apenas se conheciam vinte elementos. A cada um destes elementos associou um símbolo que, mais tarde, e por razões de carácter topográfico, assim o refere Baeyer (2000, p.16), foram substituídos pelas letras H para o hidrogénio, O para o oxigénio, Au para o ouro, e por aí fora.

¹⁵ De acordo com Asimov (2004, p.17), a teoria dos quatro elementos deve-se ao filósofo grego Empédocles (495 – 435 a.C.). Este terá afirmado que o mundo era constituído por várias substâncias básicas, ou elementos: fogo, ar, água e terra. Segundo o mesmo autor (2004, p.17), Aristóteles acrescentou a esta lista o éter, uma substância especial de que seriam constituídos os corpos celestes luminosos. Para os que aceitavam a ideia da existência de diversos elementos, e que eram atomistas, fazia sentido considerar que cada elemento era constituído por um tipo diferente de átomos, de forma que o mundo seria constituído por cinco tipos de átomos.

¹⁶ Chang (1994, p.9) define elemento como sendo uma substância que, por meios químicos, não pode ser decomposta em substâncias mais simples. Este autor refere que, até ao presente, são conhecidos 109 elementos. Destes, só 83 ocorrem naturalmente na Terra. Os outros foram gerados em laboratório por meio de reacções nucleares.

Ancorando-se em argumentos de cariz experimental, Dalton chegou bem depressa a uma consequência que, como destaca Carvalho (1975, p. 42), impressionou vivamente os contemporâneos do cientista inglês – *poder calcular os pesos dos átomos!*¹⁷ É evidente que se tratava de conhecer os *pesos* atômicos relativos, ou seja, saber quantas vezes um átomo de um elemento *pesa* mais (ou seja, tem mais massa) do que um átomo de outro. Tomando como unidade convencional o *peso* atômico do átomo de Hidrogénio, H ou $\ominus = 1$ (por ser este o elemento que figurava com menor valor em todas as relações numéricas), o *príncipe dos químicos* organizou uma lista dos *pesos* dos átomos de vários elementos, dando mais um grande passo para o conhecimento do átomo.

ELEMENTS	
Hydrogen 1	Strontian 46
Azote 5	Barites 66
Carbon 5	Iron 56
Oxygen 7	Zinc 56
Phosphorus 9	Copper 56
Sulphur 13	Lead 96
Magnesia 20	Silver 190
Linie 24	Gold 190
Soda 28	Platina 190
Potash 42	Mercury 167

Figura 21: Lista contendo os símbolos que Dalton imaginou para os elementos químicos, assim como, os pesos relativos de cada um.¹⁸

Esta lista, apesar de inovadora, tinha consideráveis incorrecções. De acordo com Gonçalves (2003, p.21), essas incorrecções resultaram de um pequeno erro de avaliação de Dalton e que acabou por custar aos químicos 50 anos de disputas (no próximo subcapítulo voltaremos a abordar este assunto). Segundo esta autora, Dalton adoptou a

¹⁷ De acordo com Asimov (2004, p.29), Dalton chamou-lhes pesos *atómicos*. Esta designação ainda é utilizada hoje, embora devêssemos falar em massas atômicas.

¹⁸ Imagem retirada do livro de Rómulo de Carvalho, *História do átomo* (1975, p.45). Segundo este autor, esta figura consta do livro de Dalton, *New System of Chemical Philosophy*, onde estão representadas as figuras simbólicas que o investigador inglês imaginou para os elementos químicos. Os números indicam os pesos relativos que Dalton atribuiu aos átomos desses elementos.

regra de maior simplicidade – “*Se dois elementos formam um só composto ele é necessariamente binário, 1:1, mas se pode formar dois compostos, um será binário (um átomo de cada espécie) e outro ternário (dois átomos de uma espécie e um da outra); e assim sucessivamente.*” Partindo deste pressuposto concluiu, por exemplo, que a água era um composto binário, sendo constituída por um átomo de hidrogénio e um de oxigénio, cujos pesos relativos seriam 1 e 7¹⁹, respectivamente. Gonçalves (2003, p.21) salienta ainda que, a estereoquímica estava presente, sem dúvida, mas de forma incorrecta, como hoje em dia bem sabemos.

No seu livro, *New System of Chemical Philosophy*, para além da representação dos vários elementos e dos seus pesos atômicos relativos, também se podem apreciar as figuras que simbolizavam as combinações entre os átomos. De acordo com o seu modelo, os átomos eram esféricos e sem estrutura interna.

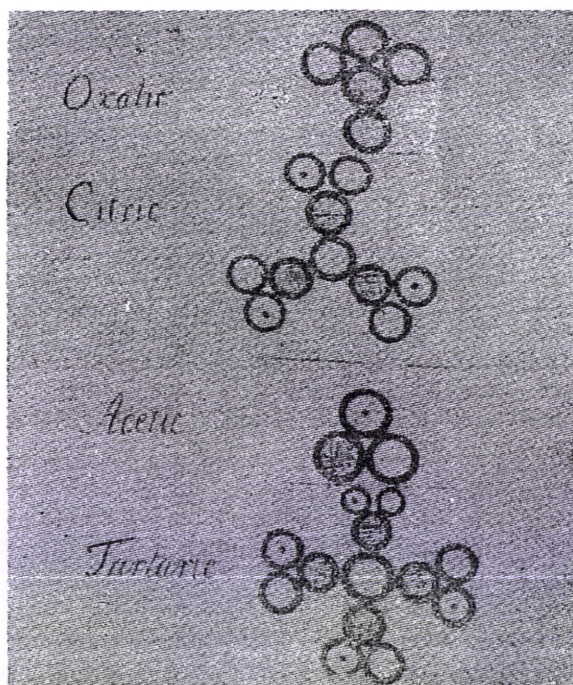


Figura 22: Representação elaborada por Dalton dos compostos ácido oxálico, ácido cítrico, ácido acético e ácido tartárico.²⁰

Apesar da teoria desenvolvida por Dalton se ter revelado tão útil na compreensão das observações em química, a aceitação de que os pequenos pedaços de

¹⁹ Segundo Rómulo de Carvalho, a insuficiência de métodos de medida empregados por Dalton levaram-no a escolher 7 para o peso atômico do oxigénio.

²⁰ Imagem retirada do livro de Rómulo de Carvalho, *História do átomo* (1975, p.47).

matéria, chamados átomos, eram reais, veio lentamente. Baeyer (2000, p.16) salienta que Dalton acreditava na realidade dos átomos, mas muitos dos seus contemporâneos não, encarando-os como uma conveniente ficção. O trabalho desenvolvido por Dalton foi notável, todavia insuficiente para estabelecer a realidade dos átomos. Knight, citado por Purrington (1997, p.122), estabelece, no nosso entender, um paralelismo quase perfeito, afirmando que Dalton foi o “*Kepler da química, que ainda esperava pelo seu Newton*”. O *Newton* de Dalton surgiria, vindo da física, sensivelmente um século mais tarde, na alvorada do século XX.

2.6. Grande polémica – Dalton versus Gay-Lussac: duas cabeças, duas sentenças

Nenhuma teoria é imediatamente aceite por todos os cientistas. Existem sempre aqueles que suspeitam das conclusões apresentadas, que reagem e fazem “contra-leituras”. As novas teorias têm que sobreviver às “provas” que a comunidade científica lhes impõe através de uma crítica fortemente sustentada. Não é de estranhar pois, tal como refere Gonçalves (2003, p.21), que em 1808, o químico francês Berthollet chamasse a atenção para os perigos da arbitrariedade da hipótese atômica de Dalton. Contudo, de acordo com a mesma fonte (2003) a resposta parcelar veio ainda no mesmo ano, mais concretamente, no dia 31 de Dezembro pela mão do francês Gay-Lussac²¹ (de quem, aliás, já falámos). Apoiando-se em dados experimentais afirmou que:

os volumes dos gases se combinam em relações simples e que o volume da combinação formada tem também uma relação simples com a soma dos volumes dos gases componentes. (p.21)

²¹ Gonçalves (2003, p.21) refere que Gay-Lussac foi aluno de Berthollet na Escola Politécnica de Paris. Mais tarde, enquanto professor, gozou de enorme prestígio, conforme atesta o testemunho deixado por um dos seus discípulos, o químico escocês Robert Christison, em 1920:

“Gay-Lussac foi porventura o mais persuasivo professor que alguma vez ouvi. A sua figura era esguia e elegante, a sua postura digna, a sua expressão convincente, a sua voz suave mas firme e clara, a sua articulação perfeita, a sua dicção concisa e selectiva, os seus modos o mais atraentes possível; e uma aula era um espécime superlativo de argumentação experimental permanentemente irrefutável. ... E fazia-o com seriedade, modéstia e simplicidade. Os alunos eram às centenas.”

Como menciona Gonçalves (2003, p.21), aparentemente tudo estava em harmonia: de acordo com Gay-Lussac, os volumes dos elementos gasosos combinavam-se segundo relações simples (relações simples de volumes); de acordo com Dalton, os átomos das substâncias combinavam-se segundo relações simples (relações simples ponderais). Gay-Lussac, porém, contestou a hipótese de Dalton e este, por sua vez, não admitiu as conclusões apresentadas por Gay-Lussac.

Carvalho (1975, p.53) afirma que, quando o químico inglês teve conhecimento da descoberta de Gay-Lussac, considerou-a tola e errada. Para ele, não podia estar certa, embora resultasse da experiência. Pais (2004) apresenta uma citação de Dalton, que é bem elucidativa da sua discórdia:

A noção de medidas [de Gay-Lussac] é análoga à minha de átomos, e, se fosse possível provar que todos os fluidos elásticos²² possuem o mesmo número de átomos no mesmo volume, números como 1, 2, 3, 4, etc., as duas hipóteses coincidiriam, ressalvando que a minha é universal e a dele se aplica apenas a fluidos elásticos. Ele apenas pode admitir que uma hipótese semelhante foi já defendida por mim e abandonada por ser insustentável. (p.107)

Gay-Lussac sugeria que todos os gases teriam o mesmo número de átomos num determinado volume (nas mesmas condições de pressão e temperatura); Dalton recusou-se a aceitar esta ideia (acontece muitas vezes um grande cientista dar um gigantesco passo em frente e *recusar-se* a dar os passos seguintes, deixando a outros a tarefa de prosseguir em frente).

As dicotomias entre estas duas concepções estavam bem patentes na justificação que cada um avançou para a composição da água. Dalton entendia (erradamente) que os átomos dos elementos que compunham a água se combinavam na proporção de um para um – 1 de oxigénio com 1 de hidrogénio. Por sua vez, Gay-Lussac admitia que esses mesmos elementos se combinavam, em volume, para formarem a água, na proporção de 1 (oxigénio) para 2 (hidrogénio). De acordo com Carvalho (1975, p.60), o cientista francês verificou experimentalmente que, quando os dois gases, oxigénio e hidrogénio, se combinavam entre si (encontrando-se nas mesmas condições de pressão e temperatura), faziam-no na proporção de 1 para 2, em volume. Constatou também, que

²² Pais (2004, p.107) refere que os fluidos elásticos são agora melhor conhecidos como gases.

o volume de vapor de água²³ que resultava dessa combinação era igual ao volume do hidrogénio que se combinara, ou seja, igual ao dobro do volume de oxigénio que foi gasto²⁴. Admitiu assim, que o volume do hidrogénio, por ser duplo, deveria ter o dobro de átomos em relação ao número dos átomos do oxigénio contidos no respectivo volume. Este argumento levou-o a concluir que um átomo de oxigénio combinar-se-ia com dois átomos de hidrogénio, e cada um desses conjuntos iria formar uma molécula de água. Carvalho (1975, p.61), através de um esquema, traduz de uma forma bastante simples e elucidativa as conclusões alcançadas pelos estudos de Gay-Lussac:

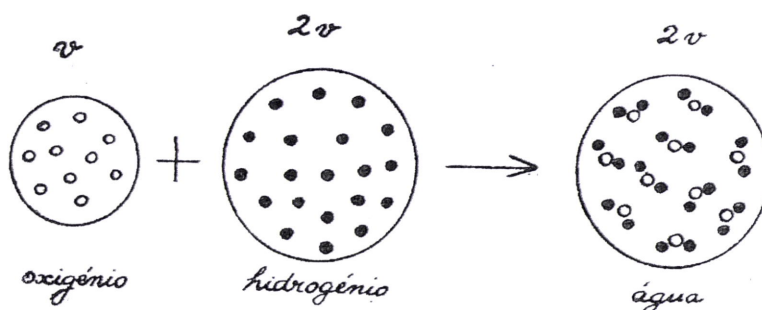


Figura 23: Esquema relativo à formação das moléculas de água de acordo com o pensamento de Gay-Lussac²⁵

De acordo com o que está representado na figura 23, para Gay-Lussac um determinado número de átomos de oxigénio (10, por exemplo) combinar-se-iam com o dobro desse número de átomos de hidrogénio (20, no mesmo exemplo) e formariam um número de moléculas de água (10 moléculas de água, conforme está representado na figura) igual ao número de átomos de oxigénio que se combinaram. É a esta conclusão que nos conduz Gay-Lussac.

²³ De acordo com Carvalho (1975, p.59), nesta situação concreta, é mais correcto dizermos *vapor de água* e não *água* porque, quando o oxigénio e o hidrogénio se combinam, fazem-no a uma temperatura muito elevada à qual a água obtida se encontra no estado gasoso.

²⁴ Segundo Carvalho (1975, p.60), poderá causar estranheza que o volume (de vapor de água) que resulta da combinação dos outros dois volumes (de oxigénio e de hidrogénio) seja apenas igual a um deles (ao de hidrogénio) e não à soma dos dois. Este fenómeno, entre gases, é muito frequente. Em geral, quando se combinam, contraem-se, resultando daí menor volume do que a sua soma.

²⁵ Imagem retirada do livro de Rómulo de Carvalho, *História do átomo* (1975, p.61).

Apesar da explicação conjecturada por Gay-Lussac ser bastante lógica, Dalton ripostava, argumentando que, como menciona Carvalho (1975, p.64), não se podia afirmar pelo facto do volume de hidrogénio ser, nesta combinação, duplo do do oxigénio, que tenha também o dobro dos átomos presentes no volume de oxigénio. A prova apresentada por Dalton resumia-se ao seguinte:

O volume de vapor de água que resultava da reacção do oxigénio com o hidrogénio era igual ao volume do hidrogénio empregado, contudo, o número total de átomos (oxigénio + hidrogénio) presentes no volume de vapor de água não era igual ao número de átomos presentes no volume de hidrogénio antes da reacção (de acordo com Dalton, teria que ser superior uma vez que resultava da combinação dos átomos dos dois gases). Este argumento contrariava o pressuposto de Gay-Lussac, que admitia que todos os gases tinham o mesmo número de átomos num determinado volume.

De acordo com Carvalho (1975, p.64), perante esta prova Gay-Lussac calava-se. Não sabia como responder a isto.

Qual dos dois caminhos deveriam então seguir os contemporâneos de Dalton e Gay-Lussac? O do primeiro, cuja opinião assentava numa hipótese arbitrária (acreditar que a combinação se faria da maneira mais simples, de átomo para átomo), ou o do segundo, cujos argumentos se baseavam na experiência? De acordo com Gonçalves (2003, p.24), o químico sueco Jöns Jakob Berzelius pôs o dedo na ferida ao explorar conjuntamente a hipótese de Dalton e as conclusões de Gay-Lussac na tentativa de determinar com rigor os pesos atómicos. Segundo a mesma autora (2003, p.24), em 1818 este químico sueco (talvez o mais reputado químico da época e a quem se deve a substituição dos símbolos de Dalton para os elementos pela letra inicial dos respectivos nomes latinos, gerando assim a actual nomenclatura) apresentou uma tabela de *pesos* atómicos, que apoiava Gay-Lussac e corrigia os pesos de Dalton (nesta tabela o hidrogénio tinha *peso* 1, o oxigénio 16, o carbono 12, etc.). Não restavam dúvidas! As considerações avançadas por Gay-Lussac, por terem uma fundamentação experimental mais sólida, conquistaram um maior número de adeptos junto da comunidade científica da época.



Figura 24: Jöns Jakob Berzelius (1779-1848)²⁶

Apesar de todas as evidências, Carvalho (1975, p.62) afirma que uma voz vinda de longe, dos Alpes italianos, da cidade de Turim, elevou-se para afirmar que para além de Dalton, também Gay-Lussac se tinha equivocado. A polémica só será ultrapassada com a invenção das moléculas.

2.7. Amedeo Avogadro anuncia a sua mensagem de paz

No final da primeira década do século XIX, a *guerra* estava ao rubro. Dalton não aceitava a justificação apresentada por Gay-Lussac e este, por sua vez, não apoiava os argumentos defendidos pelo químico inglês. De acordo com Carvalho (1975, p.62), em 1811, um desconhecido e modesto professor de física, de seu nome Amedeo Avogadro, que seguira atentamente a discussão suscitada em torno das opiniões de Dalton e Gay-Lussac, anunciou a sua mensagem de paz. Para Avogadro, as incompatibilidades entre um e outro não eram tão graves como pareciam, avançando, segundo Gonçalves (2003), com a hipótese que explicava, simultaneamente, as proporções ponderais e as volumétricas:

Nas mesmas condições de pressão e temperatura, volumes iguais de gases diferentes contêm o mesmo número de moléculas. (p.24)

²⁶ Imagem retirada do site: <http://www.uni-bayreuth.de/departments/didaktikchemie/umat/katalyse2/katalyse2.htm>

Moléculas, não átomos (como o admitira Gay-Lussac). Para Avogadro, o átomo era a entidade da *combinação* e a molécula a da *reacção*. A partir daqui tudo ficava explicado.



Figura 25: Amedeo Avogadro (1776-1856)²⁷

Carvalho (1975, p.69) refere que foi a partir deste pressuposto que Avogadro entendeu o modo como o oxigénio e o hidrogénio se combinavam para formar água. Ao contrário de Dalton e Gay-Lussac, Avogadro admitiu que os átomos de oxigénio e de hidrogénio não se encontravam livres, mas reunidos aos pares (cada par de átomos constituía uma *molécula* de oxigénio ou de hidrogénio). Avogadro foi até mais longe, admitiu que os átomos dos elementos gasosos (dos que teve conhecimento, é claro) não existiam livres, mas aos pares. Recorrendo, mais uma vez, a um esquema do extraordinário autor português Rómulo de Carvalho (1975, p.69), podemos compreender de forma clara a concepção de Avogadro:

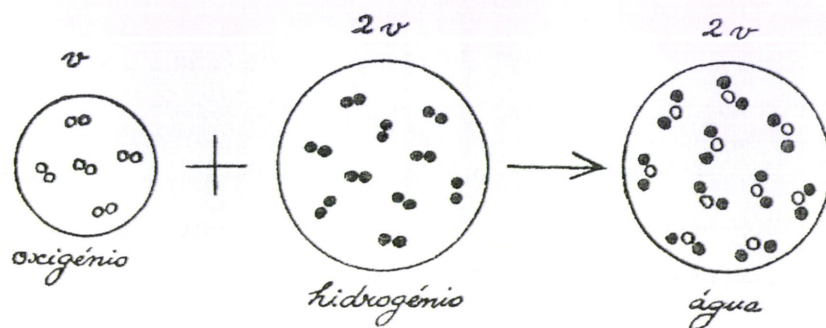


Figura 26: Esquema relativo à formação das moléculas de água de acordo com o pensamento de Avogadro²⁸

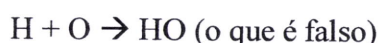
²⁷ Imagem retirada do site: <http://web.sbu.edu/chemistry/wier/matter/avogadro.html>

²⁸ Imagem retirada do livro de Rómulo de Carvalho, *História do átomo* (1975, p.69).

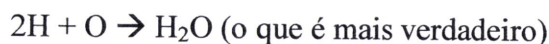
Tomando como referência a representação da figura 26, podemos comprovar que para Avogadro, um determinado número de moléculas de oxigénio (5, nesta situação) combinar-se-iam com o dobro desse número de moléculas de hidrogénio (10, no mesmo caso) e formariam um número de moléculas de água (10 moléculas de água, conforme está representado na figura 26) igual ao número de moléculas de hidrogénio que se combinaram. Assim, de acordo com a hipótese avançada em 1811 por Avogadro, nas mesmas condições de pressão e temperatura, volumes iguais de gases contêm o mesmo número de moléculas, quer se trate de substâncias simples (pares de átomos) ou de substâncias compostas (formadas pelos átomos dos diferentes elementos que as compõem).

As dúvidas que pairavam sobre as concepções de Dalton e Gay-Lussac pareciam estar finalmente dissipadas. Allègre (2005, p.27), utilizando a nomenclatura actualmente aceite, sintetiza, de forma absolutamente esclarecedora, as três perspectivas anteriormente apresentadas para descrever a formação da água.

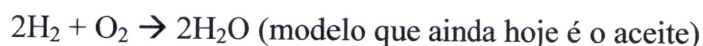
Dalton:



Gay-Lussac:



Avogadro:



Amedeo Avogadro não viu os átomos, nem os contou. No entanto, com uma intuição genial, propôs uma solução para as incompatibilidades levantadas e que no futuro veio a ser considerada como uma das verdades fundamentais dos conhecimentos sobre o átomo. De acordo com Gonçalves (2003, p.24), difícil é explicar como pôde ficar ignorada e rejeitada, por meio século, esta regra de ouro de Avogadro que tudo conjugava sem conflito. Segundo Asimov (2004, p.31), poucos foram os que lhe prestaram qualquer atenção. Não tinham ouvido falar nela, ou consideravam-na ridícula ou irrelevante. No grande pote dos que ignoraram a hipótese de Avogadro,

encontravam-se Dalton e Gay-Lussac, que se recusaram a assinar o tratado de paz proposto pelo visionário italiano. Pais (2004, p.106) afirma que a razão da oposição de Dalton e Gay-Lussac deveu-se ao facto de não se terem dado conta (ao contrário de Avogadro) de que as mais pequenas partículas de um elemento gasoso não serem necessariamente átomos, mas poderem ser moléculas. "Com a distinção entre átomo e molécula (...) eis que estão estabelecidas as bases essenciais da teoria atómica em química" (Vincent e Stengers, 1993, p.158)

Segundo Carvalho (1975, p.70), as considerações de Avogadro conduziam imediatamente a um processo muito simples para conhecer a massa das moléculas²⁹ (não a sua massa em gramas, mas a massa de uma molécula em relação a outra). Em todo este processo as comparações seriam efectuadas entre substâncias gasosas em igualdade de volume, pressão e temperatura. Como consequência da determinação da massa relativa das moléculas poder-se-ia determinar a dos átomos. Vejamos um exemplo bem ilustrativo, dado pelo nosso bem conhecido Carvalho (1975, pp.71, 72):

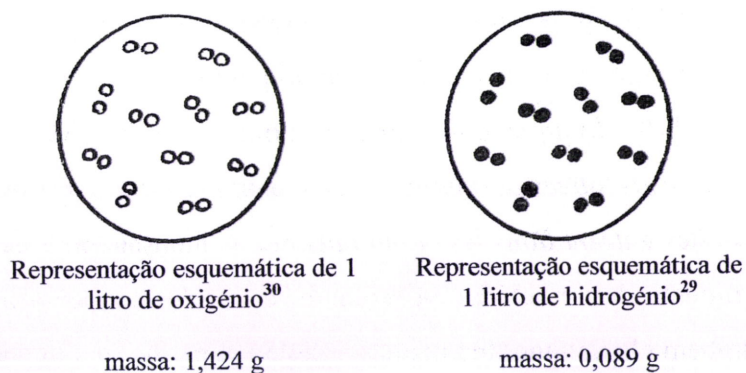


Figura 27: Massas de 1 litro de oxigénio e 1 litro de hidrogénio³¹

²⁹ Há muitos autores, entre os quais Rómulo de Carvalho, que utilizam a designação peso das moléculas (peso molecular) e peso dos átomos (peso atómico). Como foi referido anteriormente, esta designação ainda é utilizada hoje, embora devêssemos falar em massas atómicas. É evidente que nesta situação estamos a falar de massa atómicas relativas.

³⁰ O número de moléculas representado não tem qualquer relação com o número de moléculas presentes num litro de oxigénio ou hidrogénio. Neste esquema o que se pretende destacar é o facto de em volumes iguais de gases, desde que nas mesmas condições de pressão e temperatura, existem o mesmo número de moléculas.

³¹ Imagem retirada do livro de Rómulo de Carvalho, *História do átomo* (1975, p.72).

A partir dos dados da figura 27, podemos afirmar que o volume de oxigénio é 16 vezes mais *pesado* (ou seja, tem 16 vezes mais massa) do que o mesmo volume de hidrogénio (porque a razão entre a massa de um litro de oxigénio e a massa de um litro de hidrogénio é igual a 16). Seguindo o raciocínio de Carvalho, como ambos os volumes (que se supõem à mesma pressão e à mesma temperatura) contêm o mesmo número de moléculas, conclui-se que cada molécula de oxigénio tem 16 vezes mais massa do que uma molécula de hidrogénio. Acrescente-se ainda que, como cada molécula de qualquer destes gases é um par de átomos, concluímos também que um átomo de oxigénio também tem 16 vezes mais massa do que um átomo de hidrogénio. A massa atómica do oxigénio é pois 16 quando se considera a massa atómica do hidrogénio igual a 1 (recorde-se que a massa atómica do hidrogénio fora adoptada como a unidade convencional). A massa atómica do oxigénio era então, de acordo com a hipótese apresentada por Avogadro, 16 e não 7, conforme Dalton tinha admitido.

Asimov (2004, p.31) salienta que mesmo Berzelius não se serviu da hipótese de Avogadro, o que fez com que a sua tabela de massas atómicas (ou pesos atómicos conforme lhes chamara Dalton) apresentasse alguns erros.

Carvalho (1975, p.73) refere que Avogadro apresentou as suas notáveis considerações ao mundo científico, num trabalho publicado em Julho de 1811³², no tomo 73 do *Journal de Physique*, em França. Denominou-o de *Essai d'une manière de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps et les proportions selon lesquelles elles entrent dans les combinaisons*. A mensagem de Avogadro passou incompreensivelmente despercebida. No entanto, cerca de cinquenta anos mais tarde, um cientista, também ele italiano, fez justiça e elevou bem alto o nome de Avogadro!

Como explicar a pouca adesão a este avanço espantoso de Avogadro? “E contudo esta lei, luminosa aos nossos olhos, é ignorada ou rejeitada por uma maioria de químicos até aos anos 1860, e mais tempo ainda para alguns”, escrevem Vincent et Stengers (1993). E mais adiante dão-nos uma explicação: “a união de dois átomos semelhantes numa molécula parece impossível, inconcebível, principalmente no quadro da teoria electroquímica de Berzelius onde toda a combinação se explica por cargas eléctricas opostas” (1993, p.159).

³² Segundo Andrade do Santos (1946, p.35) e Carvalho (1975, p.74), André-Marie Ampère (1775-1836), apresentou três anos mais tarde e de forma independente, uma teoria muito semelhante à de Avogadro. De acordo com os mesmos autores as suas ideias também não entusiasmaram ninguém.



Figura 28: Caricatura de Avogadro³³

2.8. O Congresso de Karlsruhe e a «memória» de Avogadro: de uma hipótese a uma lei

Durante grande parte do século XIX, enquanto os investigadores se esforçavam, em vão, por pôr em ordem os conhecimentos cada vez mais abundantes do reino da química (imaginando teorias que unificassem a enorme panóplia de conhecimentos adquiridos), a obra de Amedeo Avogadro permanecia esquecida no *Journal de Physique*. No decurso deste conturbado período (que durou cerca de meio século), a confusão gerada em torno de determinados aspectos era uma constante. As publicações periódicas desta altura estavam repletas de teorias em que se expunham modos de ver que, frequentemente, se negavam uns aos outros. Os pontos de discórdia eram vários, residindo sobretudo em domínios como a velha questão acerca da realidade (ou não) dos átomos e moléculas, a nomenclatura e as massas atômicas e moleculares relativas.

Carvalho destaca (1975, p.75) que o ignorado trabalho de Avogadro era o único elemento possível de conciliação universal entre os investigadores da estrutura da matéria. Todavia, ele continuava esquecido...

³³ Imagem retirada do site: <http://www.qmc.ufsc.br/qmcweb/artigos/entrevistas/avogadro.html>

As divergências eram de tal modo profundas que seria de todo pertinente fazer alguma coisa e pôr em ordem o sistema! De acordo com Gonçalves (2003, p.27), foi isso que pensou o químico orgânico alemão Friedrich August Kekulé (e outros mais), tomando então, a iniciativa de organizar um encontro de químicos. Segundo a mesma fonte (2003) a circular de propaganda foi redigida por Kekulé e por Charles Adolphe Wurtz (1817-1884), expondo o objectivo do congresso:

Acabar com as profundas divergências de palavras e símbolos, que prejudicam a comunicação e a discussão, aspectos essenciais do progresso científico. (p.27)

Um bom exemplo das *profundas divergências de palavras* prendia-se com terminologia usada para átomos e moléculas. Allègre (2005, p.26) refere que Dalton utilizava as designações de átomos simples e átomos complexos ou compostos. A primeira designação reportava-se aos átomos e a segunda representava aquilo que hoje apelidamos de moléculas (Dalton recusou mesmo usar o termo molécula). Ao invés, de acordo com a mesma fonte (2005, p.27), Gay-Lussac e Avogadro ignoraram a palavra átomo. Para eles, a matéria era constituída por moléculas. Moléculas simples (ou seja, átomos, de acordo com a designação actual) e moléculas complexas ou compostas (actualmente utiliza-se apenas o termo molécula). A desordem reinava! Não havia consenso. Uns utilizavam as designações de Dalton e outros as de Gay-Lussac e Avogadro, ou seja, a molécula representava para uns o que o átomo significava para outros. Este e outros debates veriam o seu termo aquando do primeiro congresso mundial de química (quando Dalton, Gay-Lussac e Avogadro já tinham morrido), organizado pelos já mencionados Kekulé e Wurtz. De acordo com Pais (2004, 106), o Congresso teve lugar na cidade alemã de Karlsruhe, nos dias 3, 4 e 5 de Setembro de 1860, onde estiveram presentes 127 químicos de diversos países³⁴.

³⁴ Segundo Pais (2004, p.106) e de acordo com o site: <http://web.lemoyne.edu/~giunta/karlsruhe.html>, havia participantes da Áustria, Bélgica, França, Alemanha, Grã-Bertanha, Itália, México, Suíça, Suécia, Espanha, Rússia, Polónia e também Portugal (o digno representante português era Mide Carvalho da Universidade de Coimbra).



Figura 29: Friedrich August Kekulé (1829-1896)³⁵

Carvalho (1975, p.78) refere que a discussão desenvolvida nos três dias de Congresso foi longa e acesa, temendo-se que a iniciativa redundasse num enorme fracasso. Quase no seu *terminus*, parecia ter-se chegado à seguinte decisão: cada químico usará as designações, as representações simbólicas e as massas atômicas relativas que quiser. No entanto, o inesperado, por demais esperado, aconteceu. Stanislao Cannizzaro, italiano, químico teórico e professor de química (primeiramente em Génova e depois em Palermo e em Roma), recupera a «memória» de Avogadro e promove a assinatura do tratado de paz conjecturado, quarenta e nove anos antes, pelo seu compatriota.

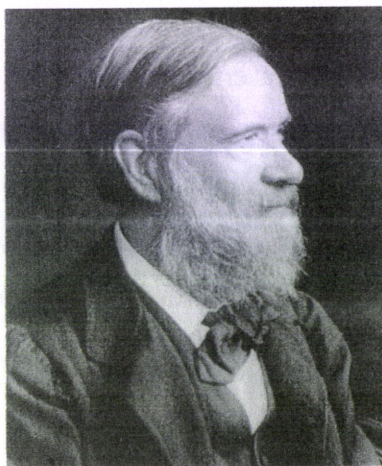


Figura 30: Stanislao Cannizzaro (1826-1910)³⁶

³⁵ Imagem retirada do site: <http://www.answers.com/topic/friedrich-august-kekul-von-stradonitz>

³⁶ Imagem retirada do site: <http://web.sbu.edu/chemistry/wier/matter/cannizzaro.html>

O ponto alto do Congresso de Karlsruhe foi, indubitavelmente, a comunicação de Cannizaro, que impôs em toda a linha as ideias de Avogadro. Átomos e moléculas foram finalmente aceites na sua verdadeira dimensão:

O átomo passou a ser considerado como a mais pequena massa capaz de existir em combinação e a molécula a mais pequena quantidade capaz de existir livremente. Cada átomo passou a ter a sua massa atómica e cada molécula a sua massa molecular.

Apesar do ponto alto do Congresso ter sido protagonizado por Cannizaro, este não esteve, de acordo com Carvalho (1975, p.79), fisicamente presente. Outro assunto que mais o entusiasmava fizera-o permanecer em Itália³⁷. Porém, não podia desperdiçar a oportunidade de expor as ideias de Avogadro num encontro onde estavam reunidos, numa mesma sala, os maiores químicos da sua época. Cannizaro teve conhecimento da teoria apresentada por Avogadro alguns anos antes da realização do Congresso.

No ano anterior ao do Congresso (1859), este professor de química italiano publicara uma série de conferências que pronunciara, desde 1854, em Génova, para informação dos estudantes de química. Nestas conferências, a que dera o título de *Sunto di un corso de filosofia chimica*, recordava e apreciava a importante «memória» do seu compatriota, ampliando-a com observações suas, de manifesto mérito. Pois, foi um maço de exemplares deste folheto que enviou para Karlsruhe, com o pedido para serem distribuídos pelos químicos presentes. Carvalho (1975, p.79) salienta que o seu pedido foi satisfeito, mas apenas numa altura em que os trabalhos do Congresso estavam a encerrar e parecia não haver consenso. As palavras proferidas pelo químico alemão Lothar Meyer (1830-1895), professor em Karlsruhe e em Tubigen, após meditação sobre o folheto de Cannizaro, reflectem bem o estrondoso impacto que as ideias de Avogadro tiveram nos congressistas. De acordo com Carvalho (1975), Meyer exprimiu a sua profunda impressão do seguinte modo:

Foi como um véu que me caísse dos olhos. Todas as dúvidas se me desvaneceram e, em lugar delas, senti uma sensação de certeza. (p.80)

³⁷ Segundo Carvalho (1975, p.79), o professor italiano era um dos mil «camisas vermelhas» que, marchando atrás de Garibaldi, proclamavam a libertação da Itália.

Apesar da aparente aceitação das ideias de Avogadro, Pais (2004, p.108) destaca que esta conferência não conseguiu aproximar de imediato os químicos. Todavia, Dmitri Ivanovich Mendeleev³⁸ recordou, trinta anos mais tarde, que a hipótese de Avogadro recebeu, graças ao congresso, um desenvolvimento mais abrangente e pouco depois conquistou todos os espíritos, adquirindo então o estatuto de lei.

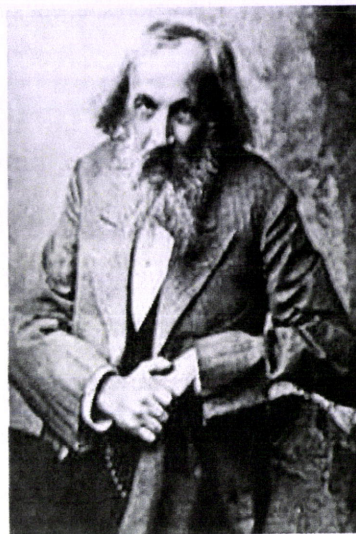


Figura 31: Dmitri Ivanovich Mendeleev (1834-1907)³⁹

A lei de Avogadro é a mais antiga das leis físico-químicas que assentam sobre a hipótese explícita de que os átomos e as moléculas são objectos reais. A lentidão com que esta viria a ser aceite pelos químicos indica claramente a resistência generalizada à ideia da realidade atômica e molecular. O debate travado entre os químicos em torno desta hipótese foi aceso. Aqueles que apelidavam a teoria atômica de desnecessária e à qual se envergonhariam de recorrer, eram prontamente atacados pelos defensores da mesma (e vice-versa). Entre os partidários da teoria atômica mencione-se Alexander Williamson (1824–1904), um atomista convicto que, de acordo com Pais (2004), afirmou na alocução presidencial de 1869 à London Chemical Society o seguinte:

³⁸ Químico russo, autor da «classificação periódica dos elementos», conhecida por «classificação de Mendeleev».

³⁹ Imagem retirada do site: http://www.virtualquimica.hpg.ig.com.br/biografia_de_famosos.htm

Acontece, por vezes, que químicos de grande autoridade se referem publicamente à teoria atómica como algo que alegremente dispensariam e a que se envergonhariam de recorrer. Parecem olhá-la como algo distinto dos factos gerais da química, algo que a ciência só ganharia se a rejeitasse completamente [...] Embora, por um lado, todos os químicos recorram à teoria atómica [...] por outro, um número considerável encara-a com desconfiança, alguns mesmo com positivo mal-estar. Se a teoria é tão errónea e desnecessária como imaginam que seja, apontem e analisem as respectivas falhas. Corrijam-nas, se possível, ou então rejeite-se a teoria, se as falhas são realmente tão irremediáveis e tão graves como está implícito nos comentários dos seus detractores, e, em sua substituição, utilize-se qualquer outra teoria. (p.108)

Asimov (2004, p.31) afirma que, até hoje, ninguém encontrou caso algum em que a hipótese de Avogadro estivesse em contradição com as observações, pelo que não é considerada uma hipótese, mas um facto (embora existam condições em que tem de ser modificada). No entanto, continua a ser designada *hipótese* de Avogadro, porque os químicos se habituaram a apelidá-la desta maneira.

Considerando as dificuldades associadas à aceitação da lei de Avogadro, o que estava a mudar nesta altura para que se ultrapassasse essa barreira? Ou, como escrevem Vincent et Stengers (1993, p.179), “por que mistério se acostumaram à ideia de uma ligação entre átomos da mesma natureza?” Mais tarde estas autoras levam-nos à resposta a esta questão: o desenvolvimento da ideia de afinidade de um corpo por ele mesmo. “Compreende-se agora porque, em 1860, no congresso de Karlsruhe, o brilhante Cannizaro pode convencer uma maioria do auditório. Depois da morte do dualismo electroquímico, e com a ideia de uma afinidade de um elemento por si só, os obstáculos principais à aceitação da hipótese de Avogadro tinham caído.” (1993, p.194)

2.9. O número N de Avogadro

Uma das principais aplicações da hipótese de Avogadro prende-se com a determinação da molécula-grama de um composto gasoso. De acordo com Perrin (1991, p.64. 1ª edição em 1913), podemos definir molécula-grama de uma espécie química como sendo a massa dessa espécie que, no estado gasoso, nas condições normais de pressão e temperatura (condições p.t.n – pressão de 1 atmosfera e temperatura de 0° C), ocupa o mesmo volume que 32 gramas de oxigénio nas mesmas condições. Escolheu-se

para termo de referência o oxigénio, cujo volume molecular corresponde a 22,4 litros (ou seja, 32 gramas de oxigénio ocupam o volume de 22,4 litros). De acordo com a hipótese de Avogadro, todas as moléculas-gramas devem ser formadas pelo mesmo número de moléculas. A este número N dá-se o nome de *constante de Avogadro*, ou *número de Avogadro* e corresponde, no caso de um corpo gasoso, ao número de moléculas existentes em 22,4 litros, a p.t.n.

Como refere Perrin (1991, p.64), dizer que 1 molécula-grama contém 1 átomo-grama de um determinado elemento, é dizer que cada uma das N moléculas desta molécula-grama tem na sua constituição 1 átomo desse elemento e, por conseguinte, o seu átomo-grama é formado por N átomos.

O conhecimento de N permite determinar a massa de uma molécula ou de um átomo, para o que basta dividir o valor da molécula-grama ou do átomo-grama por N . Exemplos:

- massa do átomo de hidrogénio (H) = $\frac{1,008g}{N}$;
- massa do átomo de oxigénio (O) = $\frac{16g}{N}$;
- massa da molécula de água (H₂O) = $\frac{18,016g}{N}$;

O mesmo procedimento pode ser seguido para os restantes átomos e moléculas.

O número de Avogadro permite, portanto, encontrar todas as massas de moléculas e átomos. Este número corresponde ao número de moléculas/átomos que existem numa mole de moléculas/átomos.

Dada a importância deste número, vários foram os físicos que procuraram determinar N . Por exemplo, em 1866, Loschmidt (1821-1895) chegou a um valor de $N \approx 0,5 \times 10^{23}$ e Maxwell, relacionando a viscosidade de um gás com o percurso médio livre das suas moléculas, estimou que $N \approx 4 \times 10^{23}$. Até finais do século XIX, assim o refere Pais (2004, p.111), a dispersão das várias determinações de N era, aproximadamente, de 10^{22} a 10^{24} . Tendo em consideração a rudimentaridade dos modelos e métodos utilizados, assinalada por todos os que trabalhavam no assunto, estes valores constituem uma proeza admirável. De acordo com Pais (2004, p.111), actualmente, o valor mais provável de N é $6,02 \times 10^{23}$.

À medida que o século XIX se aproximava do fim, generalizou-se a aceitação da realidade dos átomos e das moléculas, ainda que permanecessem algumas *bolsas de resistência* (voltaremos a este assunto mais tarde). Todavia, é correcto afirmar que o debate sobre a realidade atómica e molecular só chegou ao fim no início do século XX, fruto de desenvolvimentos que se registaram neste período. Diversos fenómenos, a alguns dos quais faremos referência mais adiante, permitiram a determinação de N (o movimento browniano é um dos exemplos). A determinação do número de Avogadro, a partir de vários fenómenos, representa uma ponte de passagem do mundo das dimensões vulgares para o mundo dos átomos.

2.10. O átomo dos físicos

Na segunda metade do século XIX, o atomismo podia ser deduzido a partir de dois grupos de fenómenos. Um deles estava relacionado com as modificações elásticas das substâncias, como a compressibilidade e a flexibilidade. Este grupo de fenómenos estava ligado às transformações físicas da matéria, isto é, àquelas que diziam respeito ao seu aspecto exterior. O outro grupo era da esfera da química e assentava nas transformações internas das substâncias. Segundo Santos (1946, p.47), era necessário estabelecer uma distinção entre as partículas postas em jogo nestes dois grupos de fenómenos. No caso dos fenómenos físicos, era de partículas compostas que se tratava, as moléculas. Os átomos intervinham, por sua vez, nas transformações químicas e entram na constituição das moléculas. Os seguintes esquemas pretendem traduzir o que foi referido:

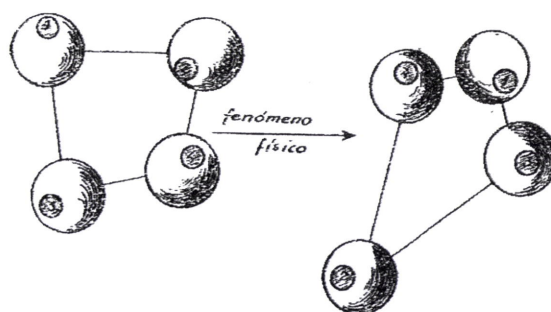


Figura 32: Esquema de uma transformação física: variação de distâncias e disposições relativas de quatro moléculas, sem alteração da sua constituição ⁴⁰

⁴⁰ Imagem retirada do livro de Santos (p.48), *O Átomo – na Filosofia, na Química e na Física*



Figura 33: Esquema de uma transformação química: alteração da constituição das moléculas em reacção⁴¹

Físicos e químicos falam, ainda hoje, com intenções distintas sobre átomos e moléculas, algo que, aliás, foi característico nos debates em torno da realidade atômica e molecular durante o século XIX. De acordo com Pais (2004, p.107), nessa altura, a realidade atômica e molecular enfrentava menos resistência em física do que em química (apesar de muitos físicos se interrogarem sobre a realidade dos átomos). O principal ponto de debate entre os químicos consistia em saber se os átomos eram entidades reais ou simples modelos imaginados para codificar as regularidades químicas e as leis. No que diz respeito aos físicos, os temas principais centravam-se em redor da energia cinética dos gases, designadamente, em torno do significado da segunda lei da termodinâmica. O apogeu da história da termodinâmica registou-se quando os físicos, a partir da relação entre o calor e os átomos, alcançaram uma explicação perfeita da segunda lei da termodinâmica.

2.11. Breves referências à termodinâmica clássica

“A energia do mundo é constante, tendendo a sua entropia para um máximo”

Rudolf Clausius⁴²

Purrington (1997, p.128) afirma que durante mais de um século, até 1780, o calor era geralmente assumido como uma manifestação do movimento dos átomos. Depois, após um período em que a teoria do calórico dominou⁴³ (sensivelmente entre 1780 e 1825), assistiu-se a uma fase de transição (onde a teoria atômica ainda estava

⁴¹ Imagem retirada do livro de Santos (p.48), *O Átomo – na Filosofia, na Química e na Física*

⁴² Citado por Pais (2004, p.84)

⁴³ De acordo com a teoria do calórico, o calor eram entendido como uma espécie de fluido subtil que podia deslocar-se duma porção de matéria para a outra.

longe de ser universalmente aceite), compreendida entre 1824 e 1850. Foi precisamente nesta época que a termodinâmica⁴⁴ se desenvolveu vigorosamente e se assistiu, portanto, à ascensão da teoria dinâmica do calor. Purrington (1997, p.132) salienta que este desenvolvimento ficou a dever-se, em grande medida, ao facto da termodinâmica clássica assentar sobre uma base macroscópica, cujas conclusões são largamente independentes da estrutura microscópica da matéria. De acordo com Allègre (2005, p.148), esta disciplina, sobretudo na sua forma clássica, é uma das mais fascinantes. Fundamentada em alguns princípios gerais muito simples, permite deduzir coisas bastante concretas e efectuar cálculos pouco complexos. E quais são esses princípios? A resposta consiste no seguinte: a energia conserva-se, o calor tende a passar do mais quente para o mais frio, toda a transformação é acompanhada de perdas – portanto, o movimento perpétuo é impossível. Foi a partir destes princípios, com a ajuda de cálculos matemáticos e bastante astúcia que se constituiu uma poderosa ciência da energia.

De uma certa maneira, o calor pode ser entendido como a forma mais fundamental de energia. Esta conotação assenta no facto de qualquer outra forma de energia poder ser «completamente» convertida em calor, ao passo que o calor não pode ser convertido completamente em energia não calorífica. As conversões de energia em trabalho (e vice-versa) inserem-se no domínio de estudo da termodinâmica. Estas conversões nunca são completamente eficientes, pelo que se registam sempre algumas perdas de energia. Todavia, a energia perdida não desaparece, antes surge como calor, que é outra forma de energia. Assim sendo, e se tivermos em consideração o calor, é correcto afirmar que a energia nunca é totalmente perdida, tal como também não se forma a partir do nada. Dito de outro modo, a quantidade total de energia do Universo permanece constante.

O que acabámos de salientar não é mais do que a primeira lei da termodinâmica ou lei da conservação da energia. Pais (2004, p.84) refere que o período da descoberta da primeira lei da termodinâmica está compreendido entre 1830 e 1850. Este autor destaca que a referida lei não surgiu do raciocínio de um único homem, mas sim de

⁴⁴ Segundo Smith, mencionado por Costa (2005, p.184), foi William Thomson (conhecido também como Lorde Kelvin) quem introduziu, pela primeira vez, o termo termodinâmica ao referir-se a máquinas termo-dinâmicas perfeitas. Uma máquina termodinâmica perfeita seria qualquer uma que conseguisse transformar toda a quantidade de calor (termo) em trabalho (dinâmica).

vários (desde engenheiros a fisiologistas) que, trabalhando independentemente e em campos diferentes, tiraram conclusões que contribuíram para o estabelecimento da mesma. Mayer (médico alemão), Joule (cientista inglês e ex-pupilo do conhecido químico Dalton) e Helmholtz, (médico e físico alemão), são apenas três dos muitos nomes a quem se deve prestar o tributo de terem contribuído para a construção da primeira lei da termodinâmica. Todos eles compreenderam que o trabalho se podia transformar em calor e que o calor se podia transformar em trabalho.



Figura 34: Julius Mayer (1814-1878) ⁴⁵



Figura 35: James Joule (1818-1889) ⁴⁶



Figura 36: Hermann von Helmholtz (1821-1894) ⁴⁷

A segunda lei da termodinâmica é outra das conquistas do século XIX. Segundo Pais (2004, p.84), foi desenvolvida em 1850 por Rudolf Clausius, quando estudava o trabalho de Sadi Carnot. Purrington (1997, p.96) refere que William Thomson também teve acesso à obra de Carnot, chegando a uma conclusão equivalente à de Clausius. Graças ao contributo de Clausius, nomeadamente, ao introduzir, em 1865, o termo entropia, a segunda lei da termodinâmica ficou igualmente conhecida por princípio de entropia. Para o desenrolar da nossa história, rumo à aceitação dos átomos e das moléculas enquanto entidades reais, a segunda lei da termodinâmica e o conceito de entropia assumem particular relevância. Apesar de numa primeira fase a sua interpretação pertencer ao domínio macroscópico, importa valorizar e explicar, ainda que de forma resumida, os contributos dados pelos cientistas mencionados.

⁴⁵ Imagem retirada do site: <http://www.nndb.com/people/013/000095725/>

⁴⁶ Imagem retirada do site: <http://www.nndb.com/people/275/000049128/>

⁴⁷ Imagem retirada do site: <http://www.creationism.org/books/TaylorInMindsMen/TaylorIMM112.htm>

De acordo com Purrington (1997, p.86), um dos grandes documentos da história da termodinâmica é o livro do engenheiro militar Sadi Carnot, intitulado “Reflexões sobre a potência motriz do fogo” e publicado em 1824. Neste livro, o engenheiro Carnot, num misto de grande imaginação e difíceis raciocínios, estabelece uma teoria sobre o poder motriz do calor. Registe-se que Carnot conjecturou esta teoria antes da primeira lei da termodinâmica ter sido formulada e mais de um quarto de século antes do estabelecimento final da segunda lei da termodinâmica!



Figura 37: Sadi Carnot (1796-1832) ⁴⁸

Partindo dos estudos que efectuou sobre a máquina a vapor, chegou a uma conclusão que assentava no seguinte: em todas as máquinas que se gera trabalho a partir do calor, este flui de uma zona a temperatura mais elevada para outra a temperatura mais baixa – por outras palavras, é necessário existir uma diferença de temperatura para que se realize trabalho. Esta conclusão representa a primeira clara definição, apesar de incompleta, da segunda lei da termodinâmica. Purrington (1997, p.86) refere que Carnot, na sua formulação, ainda utilizou a teoria do calórico. No entanto, segundo a mesma fonte (1997, p.86), Carnot, numa nota de rodapé do seu livro, afirmou que “é possível conceber o fenómeno do calor como sendo devido a outra coisa qualquer diferente de uma espécie de movimento de um corpo”. Sadi Carnot morreu prematuramente, numa altura em que, de acordo com os poucos rascunhos dos seus estudos que sobraram, parecia estar prestes a entender algo relacionado com a primeira lei da termodinâmica. Consideramos que é justo homenagear este grande Homem, a

⁴⁸ Imagem retirada do site: <http://www.history.rochester.edu/steam/carnot/1943/>

quem se deve a origem da segunda lei da termodinâmica.

O livro de Carnot representou uma nova etapa no domínio da Física, contudo não teve, após a sua publicação, a devida valorização. O reconhecimento do notável trabalho exposto nessa obra surgiria em 1834 pela mão de outro engenheiro francês de seu nome Émile Clapeyron⁴⁹ (1799-1864). Este publicou uma versão da obra de Carnot, acrescentando-lhe apenas alguns pormenores matemáticos. Esta versão revelou-se como um elemento essencial para o desenvolvimento da segunda lei.

Rudolf Clausius, físico e matemático, nascido na Prússia (actualmente Polónia) interessou-se pelos estudos de Carnot, mas teve dificuldade em aceder à obra original, pelo que ficou a conhecer os alicerces da sua teoria a partir das análises efectuadas por Clapeyron e por Thomson (de quem voltaremos a falar).



Figura 38: Rudolf Clausius (1822-1888)⁵⁰

É normalmente considerado como o primeiro a apresentar a segunda lei da termodinâmica. Facto que ocorreu, segundo Purrington (1997, p.92), em Abril de 1850, no artigo que tinha por título “Sobre a potência motriz do calor, e as leis relativamente à Natureza do Calor que por conseguinte são deduzidas”. Neste artigo, partindo do famoso exemplo da máquina a vapor, Clausius propunha-se analisar a geração de trabalho a partir do calor. De acordo com Costa (2005, p.190), Clausius estabeleceu a segunda lei da termodinâmica da seguinte forma: “O calor flui naturalmente do quente para o frio, mas não em sentido contrário”. Baeyer, referenciado por Costa (2005, p.190), frisa que o termo *naturalmente* usado por Clausius serve para clarificar que a passagem do quente para o frio se dá sem dispêndio de trabalho, ou seja, sem o recurso

⁵⁰ Imagem retirada do site: <http://www.a-i-f.it/STORIA/Personaggi/Clausius.php>

⁴⁹ De acordo com Purrington (1997, p.88), Clapeyron foi colega de Carnot enquanto estudante na *École Polytechnique* de Paris.

a qualquer fonte de energia externa. Dito de outro modo, naturalmente, «o calor não pode fluir do frio para o quente», esta passagem impõe a existência de uma fonte de energia. A formação de cubos de gelo num congelador, à custa da energia eléctrica, é um dos exemplos desta imposição.

A segunda lei formulada por Clausius faz parte das nossas experiências diárias. Por exemplo, toda a gente parece aceitar que o calor flui da sopa para o meio que a rodeia e que se encontra a temperatura mais baixa. Por outro lado, existe a convicção de que, se o processo se realizar naturalmente, não é possível retirar calor a um copo de refrigerante, se o ambiente que o rodeia estiver a uma temperatura mais elevada.

William Thomson, que adoptou, após ter sido condecorado Lorde no ano de 1892 como reconhecimento dos notáveis contributos prestados à ciência, o nome de Lorde Kelvin, foi outro dos cientistas que manifestou profundo interesse pelo trabalho de Carnot. Tomou conhecimento das conclusões a que chegara este engenheiro francês ao aceder, numa primeira fase, aos seus estudos a partir da obra de Clapeyron. Para além deste trabalho, Thomson também se interessou pelos estudos desenvolvidos por Joule.

Clausius teve acesso à investigação que Thomson desenvolvera em torno das teorias de Carnot e Joule. A informação que recolheu foi preponderante para que, em 1850, estabelecesse a segunda lei da termodinâmica.



Figura 39: William Thomson (1824-1907) ⁵¹

De acordo com Purrington (1997, p.92), foi em Agosto de 1850, que William Thomson teve acesso ao artigo onde Clausius formulara a segunda lei da termodinâmica. A publicação de Clausius possibilitou uma nova reflexão a Thomson,

⁵¹ Imagem retirada do site: <http://www.theglasgowstory.com/image.php?inum=TGSD00004>

de onde resultou a sua formulação da segunda lei da termodinâmica. Purrington (1997, p.92, 96) refere que esta formulação, publicada no artigo “Sobre a Teoria Dinâmica do Calor”, consistia, em termos gerais, no seguinte: É inevitável um desperdício de calor sempre que se gera uma quantidade de trabalho. Por outro lado, este desperdício só existirá se o calor fluir da fonte quente para a fonte fria (processo irreversível).

Apesar de enunciados diferentes, Clausius e Thomson viam a segunda lei pelo mesmo prisma.

Em 1854, Clausius, que considerava o enunciado da segunda lei da termodinâmica meramente qualitativo, reformula-a e confere-lhe um carácter quantitativo. Os estudos deste cientista incidiam agora sobre a matemática que faltava para reformular a segunda lei da termodinâmica, de modo a adquirir o mesmo formalismo da primeira lei. A quantificação da segunda lei protagonizada por Clausius foi, de acordo com Baeyer, mencionado por Costa (2005, p.197), publicada no artigo “Acerca de uma forma diferente da segunda lei da termodinâmica”.

Debruçando-se sobre o estudo de uma imaginária máquina reversível e tendo como ponto de partida que “a lei da conservação da energia exigia que a soma das duas quantidades desconhecidas deveria ser igual à energia usada e a segunda lei que nenhuma das duas fosse zero...” (Baeyer, citado por Costa (2005, p.197)), chegou à seguinte dedução para uma máquina deste tipo: o quociente entre o calor retirado à fonte quente e a temperatura a que esta se encontra é igual ao quociente entre o calor que flui para o recipiente frio e a temperatura a que este se encontra. Nos seus trabalhos, Clausius utilizou a escala de temperaturas absoluta desenvolvida por Thomson (este assunto será recuperado mais adiante), sendo a única para a qual a equação era válida.

Como no mundo real apenas funcionam máquinas irreversíveis, Clausius transportou o seu raciocínio para este tipo de máquinas. Uma vez que, de forma espontânea, o calor flui sempre de um corpo a temperatura mais elevada para um corpo a temperatura mais baixa, este investigador compreendeu que depois da passagem para a fonte fria, o denominador da equação iria diminuir. Disto resulta que o quociente aumenta, pelo que Clausius deduziu que, para máquinas irreversíveis, o quociente entre o calor e a temperatura aumenta. Até ao momento, não se conhece qualquer outro caso de um processo irreversível e espontâneo em que o quociente entre o calor e a temperatura diminua. Baeyer, referenciado por Costa (2005, 198), apresenta um exemplo, com valores, bem elucidativo. O exemplo utilizado é o de um prato de sopa

em cima de uma mesa. De acordo com os valores do exemplo, suponha-se que uma caloria de calor é transferida do prato de sopa que se encontra a uma temperatura de 330 kelvin para o meio que o rodeia e que se encontra a uma temperatura de 300 kelvin. Recorrendo à concepção de Clausius, verificamos que o quociente aumenta de 1/330 para 1/300. Segundo Baeyer, mencionado mais uma vez por Costa (2005, 198), após vários estudos, nos domínios da Física e da Química, do comportamento de gases, de sólidos e de líquidos, da literatura publicada e da sua própria prática científica acerca da transferência de calor em processos reversíveis e irreversíveis, Clausius obteve sempre resultados semelhantes. Desta forma, Clausius pode quantificar a segunda lei e afirmar que: “O calor sobre a temperatura absoluta é constante nos processos reversíveis e aumenta nos irreversíveis”.

Purrington (1997, p.95) refere que em 1865, onze anos depois da publicação do artigo onde quantificava a segunda lei, Clausius, num novo artigo intitulado “Sobre as várias formas das leis da termodinâmica convenientes para aplicações”, introduz um novo termo que representa o quociente entre o calor e a temperatura – *entropia* (simbolizada pela letra S). O seguinte excerto é uma citação de Purrington (1997) e é referente a uma passagem do artigo de Clausius publicado em 1865.

...Uma vez que eu penso que é melhor dar nomes a quantidades como esta, que são importantes para a ciência, a partir das línguas anciãs, de forma a que possam ser introduzidas sem alteração em todas as línguas modernas, proponho chamar à magnitude S a *entropia* de um corpo, da palavra grega *τροπή*, transformação. Formei intencionalmente a palavra entropia de forma a que fosse o mais semelhante possível à palavra energia, uma vez que ambas as quantidades estão tão proximamente relacionadas uma com a outra no seu significado físico. (p.95)

A partir desta altura e com a introdução da palavra entropia, a segunda lei da termodinâmica passava a adquirir a seguinte forma: Nos processos reversíveis a entropia permanece constante e nos processos irreversíveis aumenta.

De acordo com Baeyer, mencionado por Costa (2005, p.200), o princípio da parcimónia⁵² pelo qual Clausius se guiava, não permitia que ele estivesse totalmente satisfeito com este enunciado da segunda lei. Assim, atendendo a que em qualquer processo que envolva transferência de calor, a entropia total do sistema aumenta,

⁵²No princípio da parcimónia incluem-se as teorias que fornecem o máximo de informação no mínimo formalismo.

Clausius passou, segundo a mesma fonte, a atribuir à segunda lei da termodinâmica o seguinte enunciado: A entropia do Universo tende em direcção a um máximo.

Clausius interpretou o significado de entropia em termos macroscópicos, contudo, outras figuras surgiram e alcançaram o mesmo objectivo a nível microscópico.

No desenrolar desta importante fracção da história da ciência, é de realçar o trabalho efectuado por William Thomson (Lorde Kelvin), que esteve muito próximo do conceito de entropia. Os contributos deste extraordinário físico para a termodinâmica clássica foram notáveis. A escala Kelvin de temperatura é outro bom exemplo do seu legado neste ramo da física. Efectuando experiências com gases, onde relacionava a temperatura, a pressão e o volume, chegou, a partir da extrapolação do seu trabalho experimental utilizando as leis de Charles e Gay-Lussac, à conclusão, em 1848, de que a temperatura mais baixa que qualquer substância pode atingir é de $-273,15^{\circ}\text{C}$. Por outras palavras, à medida que a temperatura diminui, um gás contrai-se e, chegando à temperatura de $-273,15^{\circ}\text{C}$, o seu volume é zero. De acordo com Baeyer, citado por Costa (2005, p.180), “Uma vez que um volume negativo é impossível, aquele mágico $-273,15$ graus é a temperatura mais baixa atingível.” A partir destas considerações, passou a existir uma escala absoluta de temperaturas, a qual, como homenagem, se deu o nome de escala Kelvin. Nesta escala, independente das características de uma substância específica, o valor $-273,15$ corresponde ao zero absoluto na escala Celsius. Como o zero absoluto é igual a $-273,15^{\circ}\text{C}$, então 0°C correspondem a $273,15^{\circ}\text{K}$ (de Kelvin). Mais tarde, como menciona Asimov (2004, p.58), fruto do desenvolvimento da teoria cinética, a noção de zero absoluto passou a ter mais uma interpretação: “Quanto mais frio fica um corpo, mais lento se torna o movimento dos seus átomos e moléculas. Se o corpo arrefecer suficientemente, a sua energia cinética atinge um valor mínimo. A partir desse ponto não pode baixar mais, e a temperatura encontra-se no zero absoluto.”

Em termos gerais e de acordo com Purrington (1997, p.100), após a morte de Clausius, o físico americano Josiah Willard Gibbs⁵³ contribuiu com um artigo para a Academia Americana de Artes e Ciências, onde defendia que a partir do artigo publicado por Clausius, em 1850, “a ciência termodinâmica passara a existir”.

No último terço do século dezanove, a termodinâmica evoluiu por caminhos separados. Um deles conduziu ao estabelecimento da teoria cinética dos gases (em que a expressão “cinética” provém duma palavra grega que significa «movimento»), criada

⁵³ Allègre (2005, p.200) refere que os cientistas americanos dizem hoje que foi o primeiro «grande cientista» americano.

por Clausius e Maxwell nas décadas de cinquenta e sessenta do século dezanove. Esta forneceu uma fundamentação microscópica à teoria do “calor”. A partir da teoria cinética dos gases, desenvolveu-se a mecânica estatística, fundada, segundo Purrington (1997, p.101), por Boltzmann, mas elaborada com grandeza por Gibbs e Einstein.

2.12. Recuperação de uma outra «memória» e o desenvolvimento da teoria cinética no século XIX

A descrição de gás protagonizada por Bernoulli foi uma das «memórias» retomada pelos físicos do século XIX e que serviu de trampolim para ascender até à mais elevada e profunda escala de reflexão sobre a segunda lei da termodinâmica. Recorde-se que Bernoulli foi um dos primeiros cientistas a dar uma interpretação cinética à lei de Boyle-Mariotte, ao admitir que as propriedades macroscópicas de um gás poderiam ser compreendidas em função do movimento dos átomos que o constituem. Gibert, citado por Costa (2005, p.212), afirma que os estudos de Bernoulli contribuíram para que, pela primeira vez na Física, se desenvolvesse o conceito de certos fenómenos macroscópicos serem manifestações de natureza estatística, probabilística, de fenómenos microscópicos, individuais, moleculares (ou atômicos).

No século XIX a influência de Newton era enorme, não só ao nível da teoria atômica, como também na promoção da teoria dinâmica do “calor”. Como salienta Purrington (1997, p.128), no final da década de cinquenta deste século, a teoria cinética dos gases ergueu-se numa tentativa de dar à teoria dinâmica do “calor” uma base microscópica, criando um campo da física que requeria a existência de átomos. Para esta ideia de “calor” como movimento de corpúsculos muito contribuiu Joule, talvez pela importância que Dalton teve na sua formação (ver Cardwell D.S.L (1989). *James Joule*. Manchester: Manchester University Press). A partir desta data, começou uma nova era – a era do atomismo físico quantitativo – na qual, pela primeira vez, se poderiam submeter a testes experimentais algumas previsões acerca da teoria atômica. Submetendo a hipótese atômica a um tratamento quantitativo, seria possível tentar obter informações sobre medidas atômicas e moleculares, nomeadamente sobre a distribuição de velocidades.

Segundo Purrington (1997, p.135), Clausius contribuiu decisivamente para o estabelecimento da moderna teoria do calor, entendida como uma expressão do movimento de átomos e moléculas. Neste âmbito, a sua notável «marca» ficou registada nos artigos publicados em 1857 e 1858, cujos títulos eram “Sobre o tipo de movimento que designamos por calor” e “Sobre as distâncias médias dos percursos descritos por moléculas separadas em corpos gasosos”, respectivamente.

No primeiro trabalho, Clausius recupera a «memória» de Bernoulli. Partindo das propriedades macroscópicas de um gás, como a pressão e o volume, pretendia descobrir algo acerca das propriedades microscópicas do mesmo, tal como a massa e a velocidade das moléculas que o constituíam. Relacionando as propriedades macroscópicas e microscópicas referidas, Clausius pretendia construir um modelo que não se afastasse muito da realidade molecular. No seu modelo, encarava as moléculas como esferas de reduzidíssimas dimensões, de tal maneira que, como salienta Purrington (1997, p.136), nunca chocavam umas contra as outras. Entendia que, devido às suas pequeníssimas dimensões, poderia desprezar a sua massa e assim, estas movimentar-se-iam facilmente no interior do gás, em linha recta, a alta velocidade e sem colidirem umas com as outras. No que concerne à velocidade, entendeu que não podia dar uma resposta individual, uma vez que o seu modelo pressupunha uma grande quantidade de moléculas no interior do gás. Como tal, admitiu que todas as moléculas tinham a mesma velocidade, correspondendo à velocidade média do conjunto das pequenas partículas.

Segundo Pais (2004, p.109), foi também no artigo intitulado “Sobre o tipo de movimento que designamos por calor” que Clausius relacionou os diferentes tipos de movimento molecular com a distinção entre sólidos, líquidos e gases.

O segundo artigo, publicado em 1858, surgiu como resposta aos críticos que protestavam sobre um aspecto particular da sua teoria. De entre estes, saliente-se o meteorologista alemão Christoph Buys-Ballot (1817-1890) que, ao ler o artigo publicado um ano antes, fez, segundo Purrington (1997, p.138), a seguinte objecção: se as moléculas se movem em linhas rectas, dada a sua velocidade elevada, os volumes de gases em contacto teriam necessariamente de se juntar rapidamente, no entanto, este facto não é observado. Este aparente paradoxo contribuiu para que Clausius ajustasse alguns pontos da sua teoria.

Tendo por base várias situações do dia-a-dia, é fácil constatar a pertinência da dúvida colocada por Buys-Ballot. No seu primeiro artigo, Clausius admitira que as

moléculas se moviam livremente a grande velocidade e, como eram tão pequenas, não colidiam umas com as outras. Efectivamente, se as moléculas se movessem livremente, conseguiriam atravessar uma sala centenas de vezes em poucos segundos, todavia, não é o que sucede. A partir do exemplo seguinte, depreende-se que a teoria de Clausius dificilmente se adequava à evidência empírica.

Se pensarmos numa sala, onde se encontra um fumador, verificamos que o odor do fumo não atravessa de imediato a sala onde este se encontra e também não desaparece instantaneamente. Esta situação indica que as moléculas de fumo não se misturam de imediato com as moléculas do ar, pelo que é credível afirmar que as partículas que constituem a matéria não se deslocam tão rapidamente como Clausius defendera. À luz deste argumento, Clausius propôs-se reformular a sua teoria.

Na reformulação que apresentou no artigo “Sobre as distâncias médias dos percursos descritos por moléculas separadas em corpos gasosos”, passou a admitir que o tamanho das moléculas não podia ser desprezável e que no decurso dos seus movimentos incessantes chocavam umas com as outras. Uma vez que no interior de qualquer substância o número de moléculas é bastante elevado, Clausius chegou à conclusão que, apesar das suas reduzidas dimensões, é forçoso que as colisões entre elas sejam frequentes. Ao admitir os choques entre as moléculas, teve que abandonar o pressuposto de um percurso em linha recta, pois sempre que ocorre uma colisão entre moléculas, as suas direcções alteram-se. Deste modo, as moléculas «atrasam-se», impedindo que a mistura de gases seja imediata. O contributo de Clausius não ficaria por aqui, introduzindo na sua teoria um novo conceito – “caminho/percurso médio livre”. Segundo Purrington (1997, p.138), Clausius chegou a este conceito tendo por base uma relação quantitativa, onde incluía o “cálculo da **probabilidade** que uma molécula teria de ser capturada numa camada espessa”. Com este suporte quantitativo, baseado na relação entre as dimensões das moléculas e a distância que estas conseguiriam percorrer sem serem «importunadas» por uma colisão, este extraordinário investigador pretendia calcular a distância que as moléculas conseguiam percorrer entre colisões. De acordo com Smith, mencionado por Costa (2005, p.214), Clausius, durante o seu estudo, terá formulado a seguinte questão: “Que distância, em média, consegue uma molécula percorrer antes do seu centro de gravidade entrar na esfera de acção da outra molécula?” Seguindo as mesmas fontes, refira-se que depois de calcular o valor da distância média, Clausius encontrou uma resposta à crítica feita por Buys-Ballot. Assim,

a sua teoria não apontava para que duas quantidades de gás se misturassem rápida e violentamente, mas antes que, só um número comparativamente pequeno de moléculas consegue percorrer grandes distâncias depressa, enquanto que a maior parte misturam-se gradualmente na superfície de contacto.

O artigo de Clausius, publicado em 1858, marcou o início de uma nova forma de interpretar o gigantesco e, ainda, invisível micromundo atómico e molecular. A melhor forma para estudar uma população de átomos e moléculas, onde se lida, não com centenas, milhares ou dezenas de milhares de indivíduos, mas com milhares de bilião, é através de um instrumento muito diferente daquilo que se recorreu ao desenvolvimento da Mecânica Newtoniana (cálculo diferencial). Clausius, neste artigo, recorrendo a cálculos baseados em médias, introduz a ideia de que, ao nível atómico e molecular, um acontecimento pode ser visto como mais provável ou menos provável. Outros que se seguiram (assim o veremos nos próximos capítulos), como Maxwell, Boltzmann, Gibbs e Einstein, contribuíram para o desenvolvimento desta ideia, sendo que a Boltzmann e a Gibbs se atribui a conotação de fundadores da mecânica estatística. Como destaca Purrington (1997, p.139), a mecânica estatística levou a teoria cinética muito para além das propriedades termodinâmicas de um gás, conduzindo-a a propriedades como a difusão e a viscosidade.

Capítulo 3 – O “louco” final do século XIX

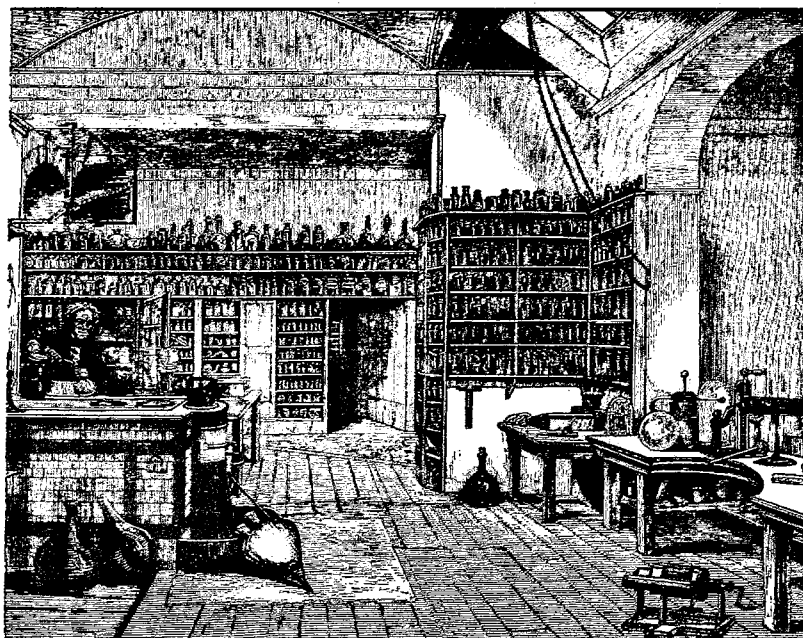


Figura 40: Exemplo de um laboratório do século XIX ¹

3.1. O acaso em socorro das moléculas e dos átomos

Toda a gente tem, por certo, gravado na sua memória, o espectáculo oferecido por uma multidão num átrio de uma estação de metro em horas de ponta. A desordem reina, assistindo-se ao movimento frenético das pessoas, que ao procurarem entrar e sair do metro, esbarram frequentemente umas contra as outras. Agora, extrapolando, podemos imaginar o que sucede quando vários milhões de pequenas partículas, átomos e moléculas, se encontram encerradas numa caixa. De acordo com a teoria cinética, essas minúsculas partículas agitam-se em todas as direcções, colidem umas nas outras, mudam de direcção, voltam a colidir, ressaltam, transmitindo uma impressão global de agitação desordenada.

Para compreender um sistema desta natureza, onde se lida com uma gigantesca população, é necessário renunciar à ideia de descrever individualmente cada partícula, em benefício duma descrição estatística do comportamento médio da partícula e suas

¹ Imagem retirada do livro de Purrington, *Physics in the Nineteenth Century*

desviantes. Torna-se, portanto, fundamental recorrer ao cálculo das probabilidades para avaliar e caracterizar sistemas deste tipo. Nos cálculos de Física clássica o resultado é um número, enquanto que nos da Física estatística, o resultado é uma distribuição de comportamentos.

A Física nascente no final do século XIX (Física Estatística) colocou questões novas já que o conhecimento determinista sofreu alguma instabilidade, dando origem a novas formas de pensar. No final do século XIX, por entre agitados debates e intelectualmente muito violentos, desenvolve-se verdadeiramente a Física estatística, nomeadamente a mecânica estatística. Segundo Allègre (2005, p.199), a mecânica estatística ia, na plenitude, contra dois preconceitos solidamente instalados nas mentes da altura. O primeiro reporta-se à oposição manifestada por alguns em aceitarem a ideia de átomos e moléculas, sob o pretexto de que não se viam. O segundo preconceito assentava na questão: Como é possível a Natureza, cujas leis são perfeitamente claras, perfeitamente determinadas, obedecer ao cálculo das probabilidades? Esta questão representava uma recusa em relação à utilização do cálculo das probabilidades

A mecânica estatística é o corolário da teoria cinética dos gases, tendo contribuído para ambas homens tão excepcionais como dissemelhantes. Purrington (1997, p.101, 147) salienta que a teoria cinética se desenvolveu entre 1857 e 1872 pelas mãos de Clausius, Maxwell e Boltzmann. De entre estes, poderá atribuir-se a Boltzmann (este cientista concedeu admiráveis acrescentos à teoria cinética, nomeadamente a partir da sua interpretação da segunda lei da termodinâmica), o título de fundador da “descendente” mecânica estatística. Posteriormente, sobretudo devido aos trabalhos desenvolvidos por Gibbs e Einstein, a mecânica estatística atingiu maior maturidade. Este novo ramo da física contribuiu activamente para a aceitação da teoria atómica da matéria; forneceu, pela primeira vez, uma base microscópica à termodinâmica; e desempenhou um papel crucial na criação da teoria dos *quanta*, particularmente através dos estudos feitos por Planck e Einstein. No século XX esteve intrinsecamente associada à teoria dos *quanta*, tornando-se num dos mais importantes instrumentos da moderna física teórica. Actualmente, a mecânica estatística é largamente utilizada tanto em sistemas clássicos como em sistemas quânticos. É igualmente aplicada, de entre outros, ao estudo das propriedades da matéria condensada, dos materiais magnéticos, dos gases e dos plasmas.

3.2. O triunfo da teoria cinética

Os mestres da teoria cinética do século XIX, Clausius, Maxwell e Boltzmann eram – por definição, digamos – atomistas. As raízes desta teoria assentam na crença da realidade atômica e na convicção de que tudo aquilo que se conhecia acerca do calor poder ser interpretado de forma satisfatória se se pensasse em termos de átomos e moléculas que se deslocavam, rodopiavam ou vibravam.

Clausius, como verificámos no capítulo anterior, era um atomista confesso. Maxwell, que estudara e fora professor em Cambridge, também o era. A crença no atomismo deste gentil-homem escocês, uma das lendas da Física e autor da grandiosa teoria da unificação electromagnética (traduzida pelas quatro equações de Maxwell), é bem evidente nos contributos que deu para o desenvolvimento e estabelecimento da teoria cinética. A sua convicção em relação ao atomismo era de tal ordem que, de acordo com Pais (2004), em 1873 afirmou o seguinte:

“Ainda que no decorrer dos tempos tenham ocorrido catástrofes, e talvez possam ainda ocorrer nos céus, ainda que sistemas antigos possam ter sido dissolvidos e novos sistemas possam emergir das suas ruínas, as moléculas [isto é, os átomos!] de que se compõem estes sistemas [a Terra e todo o Sistema Solar] – as pedras fundamentais do universo material – permanecem intactas e frias. Continuam hoje como foram criadas – perfeitas em número, medida e peso ...” (p.109)

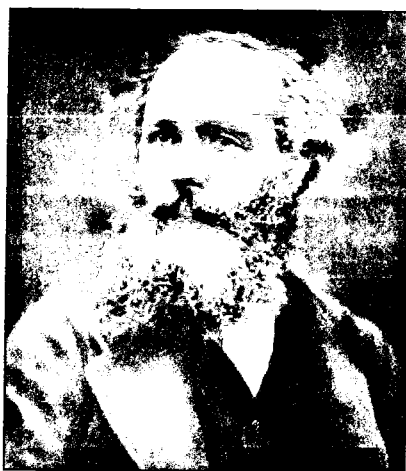


Figura 41: James Clerk Maxwell (1831-1879) ²

² Imagem retirada do site: <http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Gallery/Gallery9.html>

Koestler (1969, p.438) atribui a Maxwell a denominação de “gigante de dupla face”. De facto, esta denominação assenta-lhe na perfeição: por um lado, completou o edifício clássico do universo Newtoniano (onde se enquadram os trabalhos que realizou sobre o electromagnetismo), por outro, inaugurou a era daquilo a que, segundo Koestler (1969, p.438), se pode chamar física “surrealista” do século XX.

Maxwell estava ciente das limitações de uma concepção rígida e determinística da natureza. Como tal, propôs uma abordagem revolucionária à dinâmica dos gases, substituindo a mecânica clássica por uma aproximação estatística baseada na teoria das probabilidades. Esta nova concepção representou um passo decisivo rumo à física quântica e ao princípio do indeterminismo clássico. Este extraordinário físico sabia que a sua abordagem não só teria impacto na Física, como também na Filosofia. É isso que podemos constatar através das palavras de Maxwell, citado por Koestler (1969):

“É provável que resultados importantes possam vir a ser obtidos pela aplicação do método estatístico, que ainda é pouco conhecido e não é familiar às nossas mentes. Se a actual história da Ciência fosse diferente, e se as doutrinas científicas que nos são mais familiares fossem aquelas que se expressam desta forma, é possível que nós pudéssemos ter considerado a existência de um certo tipo de contingência (...), e tratar a doutrina do determinismo filosófico como um mero sofisma.” (p.440)

De acordo com Koestler (1969, p.440), Maxwell, aos vinte e quatro anos, já se tinha apercebido das limitações da filosofia materialista. Vinte anos mais tarde, no auge da sua fama, deu largas ao seu *hobby*, escrever versos satíricos (o sentido de humor era uma das características marcantes deste notável escocês), para ridicularizar o materialismo banal. A ocasião escolhida foi um encontro da *British Association*, que teve lugar em Belfast. Nesta sátira de Maxwell, cuja citação se atribui a Koestler (1969), podemos atestar a sua devoção ao atomismo.

*In the very beginning of science,
the parsons, who managed things then,
Being handy with hammer and chisel,
made gods in the likeness of men;
Till Commerce arose, and at length
some men of exceptional power
Supplanted both demons and gods by
The atoms, which last to this hour.*

*From nothing comes nothing, they told us,
nought happens by chance but by fate;
There is nothing but atoms and void,
all else is mere whims out of date!
Then why should a man curry favour
with beings who cannot exist,
To compass some petty promotion
in nebulous kingdoms of mist? ...*

*First, then, let us honour the atom,
so lively, so wise, and so small;
The atomists next let us praise, Epicurus,
Lucretius, and all;
Let us damn with faint praise Bishop Butler,
in whom many atoms combined
To form that remarkable structure,
it pleased him to call – his mind.*

(p.440)

Curiosamente, Maxwell, partidário da doutrina atomista, ao ler o trabalho de Clausius “Sobre a natureza do movimento a que chamamos calor”, mostrou um certo cepticismo em relação a uma teoria que baseava toda a sua estrutura numa realidade que, à data, não estava confirmada – a realidade dos átomos e das moléculas (Smith, referenciado por Costa (2005, p.218)). Maxwell teve acesso à obra de Clausius no ano de 1859, quando era professor na Universidade de Aberdeen, na Escócia. O conteúdo deste trabalho desde logo lhe chamou a atenção, pelo que foi conduzido para um novo mundo gigantesco, invisível e probabilístico. Do artigo de Clausius, Maxwell retirou a ideia de “caminho médio livre” e a sugestão de que uma abordagem estatística devia ser usada para descrever o movimento molecular num gás. No entender deste cientista escocês, uma abordagem deste género era a única solução viável para descrever o comportamento de um tão elevado número de partículas, movendo-se muito rapidamente e agitando-se ao acaso. Era impossível descrever o movimento das moléculas individualmente, impondo-se, tal como Clausius já havia manifestado, uma descrição em conjunto. Deste modo, não existindo alternativa, Maxwell recorreu ao cálculo das probabilidades.

De acordo com Purrington (1997, p.139), em 1860, inspirado pela obra de Clausius, publica o seu primeiro artigo sobre o assunto, cujo título era “Explicações da Teoria Dinâmica dos Gases”. Neste artigo desenvolve a descrição estatística de um gás, introduzindo algumas alterações em relação ao modelo descrito por Clausius. Recorde-se que este último, no seu modelo, admitira um valor médio para a velocidade das moléculas, atribuindo a todas elas esse valor médio. Apesar de ter admitido a possibilidade da velocidade de bastantes moléculas diferir de modo relevante do seu valor médio, optou pela hipótese de que todas as moléculas se moveriam com a mesma velocidade, que seria a velocidade média de todas elas (Purrington, 1997, p.139). Maxwell, no seu modelo, não desprezou tal valor. Atendendo ao tão elevado número de partículas, considerou que o valor médio de velocidade a que as moléculas se agitavam não deveria variar muito ao longo do tempo. Contudo, não se ficou por aqui, a sua interpretação iria revolucionar a física. Segundo Purrington (1997, p.138), ele foi o primeiro a presumir que as velocidades obedeciam a uma distribuição de probabilidade.

De acordo com a sua distribuição das velocidades moleculares, admitiu que a maioria das moléculas se movimentavam com uma velocidade próxima da velocidade média, mas que algumas possuíam valores muito superiores ao valor médio e outras valores muito inferiores ao valor médio. Dito de outra forma, as moléculas que se movimentavam no interior de um gás podiam experimentar qualquer valor de velocidade. A previsão levada a cabo por Maxwell foi de tal modo importante que representa um marco na transição entre o mundo da certeza e o mundo da incerteza. O progresso tecnológico veio a demonstrar, alguns anos mais tarde, que a previsão deste cientista escocês estava correcta. De acordo com Holton et al. (1980, p.82), desde 1920 que a verificação experimental indica que as velocidades das moléculas se distribuem de acordo com a previsão de Maxwell.

Algum tempo após a apresentação do novo modelo proposto por Maxwell para descrever o movimento das partículas que se encontram no interior da matéria, entra em cena um austríaco, de seu nome Ludwig Boltzmann, que adopta a abordagem estatística de Maxwell, desenvolve-a ainda mais e estabelece as fundações da mecânica estatística. Este austríaco era mais jovem que Maxwell, por quem, diga-se, nutria uma profunda admiração. Allègre (2005, p.200) refere que Boltzmann era um homem fantástico, intelectualmente ambicioso, brilhante matemático, possuindo ao mesmo tempo imaginação e técnica. Contudo, era também ultra-sensível, revelando sinais de grande

instabilidade emocional, tendo mudado de residência e emprego frequentemente (sentia-se insatisfeito até com as disciplinas que leccionava). Do seu currículo constam as Universidades de Viena, Graz, Munique e Leipzig e as cátedras de Física-Matemática, Matemática, Física experimental e Física teórica. Purrington (1997, p.142) acrescenta que este físico também passou algum tempo em Heidelberg e especialmente em Berlim, onde trabalhou com Gustav Kirchhoff e Helmholtz. Incompreendido por alguns, acabaria por se suicidar em Setembro de 1906.



Figura 42: Ludwig Boltzmann (1844-1906) ³

Boltzmann nasceu em Viena e estudou física na universidade local, recebendo o seu doutoramento em 1866. Segundo Purrington (1997, p.142), em Viena foi influenciado por Josef Stefan (1835-1893), com quem trabalhou até 1869, e por Johann Josef Loschmidt. Foi através destes dois homens que teve acesso à teoria cinética dos gases, que passaria a ser um dos alvos do seu interesse, uma vez que punha em destaque as pequenas entidades – átomos e moléculas – cuja existência defendia acerrimamente. Ao ler o trabalho de Maxwell, facultado por Loschmidt, ficou fascinado. Todavia e apesar do encantamento que sentiu, este talentoso austríaco decidiu acrescentar algo ao mesmo. Em 1868, com apenas vinte e quatro anos, publica o seu primeiro artigo, onde generaliza o trabalho de Maxwell e apresenta a famosa distribuição de Maxwell-Boltzmann. De acordo com Baeyer, referenciado por Costa (2005, p.235), a

³ Imagem retirada do site: http://www.astrocosmo.cl/biografi/b-l_boltzmann.htm

principal novidade que Boltzmann introduziu na teoria de Maxwell foi a contemplação da energia potencial das moléculas que constituíam o gás. Enquanto que Maxwell, para caracterizar a temperatura do gás, considerava apenas a energia cinética das moléculas, Boltzmann admitiu que as moléculas, para além de energia cinética, possuíam, também, energia potencial. Como salienta Purrington (1997, p.142), a distribuição de Maxwell-Boltzmann tem larga aplicação na física, nomeadamente, sempre que um sistema constituído por moléculas (e átomos) tenha atingido o equilíbrio térmico, a uma temperatura T , devido às colisões entre as moléculas e/ou com as paredes do recipiente onde estão contidas.

Maxwell e Boltzmann, ao desenvolverem a teoria cinética em termos matemáticos, marcaram o início de uma nova era. Tal como menciona Asimov (2004, p.58), graças aos trabalhos destes físicos, no final da década de sessenta do século XIX a teoria cinética dos gases passou finalmente a ser aceite por muitos físicos. Os dois cientistas demonstraram que tudo aquilo que se conhecia acerca do calor podia ser interpretado de forma satisfatória se pensássemos em átomos e moléculas que se deslocavam ou vibravam com diferentes velocidades, descrevendo um movimento caótico. A partir daqui vários conceitos ficaram clarificados:

- a temperatura é uma medida da agitação dos átomos e das moléculas;
- o calor corresponde ao fluxo de energia de um corpo a temperatura mais elevada para outro a temperatura mais baixa;
- o movimento associado às partículas constituintes da matéria não corresponde ao calor, mas sim, à energia interna dos corpos (esta última corresponde à soma da energia potencial e da energia cinética dos átomos e das moléculas);
- quando se transfere energia sob a forma de trabalho para um sistema ou quando um sistema transfere energia sob a forma de trabalho para a vizinhança, estimula-se a organização das partículas que fazem parte do sistema ou da vizinhança;
- quando se transfere energia sob a forma de calor para um sistema ou quando um sistema transfere energia sob a forma de calor para a vizinhança, estimula-se a desorganização das partículas que fazem parte do sistema ou da vizinhança.

Segundo Purrington (1997, p.141), em 1871, Maxwell publicou o livro “Teoria do calor”, do qual constavam os estudos teóricos e experimentais que haviam sido realizados sobre o calor. Neste livro, substituiu a expressão “teoria dinâmica dos gases” para “teoria cinética dos gases”. Esta teoria, cujo nome tinha sido alterado, assentava

(com foi relatado) na concepção de que no mundo microscópico dos gases, um número elevadíssimo de partículas se movimentava aleatoriamente e obedecendo às leis de Newton. Seria, então, possível aplicando o conhecimento da mecânica passar do domínio do micro para a compreensão do domínio do macro.

3.3. A natureza estatística da segunda lei da termodinâmica

Parece que Maxwell foi o primeiro a afirmar a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica (Pais, 2004, p.84). Recorrendo a um mundo divertido e imaginário, em que os seres dominantes eram uns habilidosos «demónios», Maxwell defendia que a segunda lei da termodinâmica tinha uma natureza diferente das outras leis estudadas até aqui. Este escocês deu início a um caminho que culminou no seguinte: enquanto que a primeira lei da termodinâmica ou as leis da mecânica têm um carácter absoluto, a segunda lei tem um carácter estatístico. Afinal, e de acordo com esta nova interpretação, a energia sob a forma de calor poderá não fluir apenas do quente para o frio!?!

De acordo com Pais (2004, p.84) e Smith, citado por Costa (2005, p.230), numa carta dirigida a Tait⁴ sobre os seus «demónios», presumivelmente escrita já em 1868, Maxwell abordou, no seu estilo humorístico e imaginativo, os respectivos nomes, características e objectivo:

1 – Quem lhes deu este nome? Thomson

2 – O que eram eles segundo a natureza? Muito pequenos, mas seres vivos incapazes de realizar trabalho, porém capazes de abrir e fechar válvulas que se movem sem fricção ou inércia.

3 – Qual era o seu objectivo principal? Mostrar que a segunda lei da termodinâmica tem uma certeza apenas estatística.

4 – O restabelecimento da desigualdade de temperaturas era a sua única ocupação? Não, visto que demónios menos inteligentes podem produzir uma diferença na pressão, assim como na temperatura, apenas permitindo que todas as partículas fluam numa direcção, enquanto páram todas as que seguem noutra direcção. É tal como uma válvula. Não se deve chamar de demónio mas de válvula...

⁴ Amigo de Maxwell. Segundo Pais (2004, p.84), em Dezembro de 1867 Maxwell escrevera uma carta a Tait onde introduziu «um ser finito que conhece os percursos e as velocidades de todas as moléculas por simples inspecção». Desta correspondência entre os dois amigos nasceu um ser que ficaria famoso. Tait mostrou esta carta a William Thomson (Iorde Kelvin), que apadrinou o misterioso ser, atribuindo-lhe o nome *demónio*. Como foi uma criação de Maxwell, ficou conhecido por demónio de Maxwell.

O demónio não era um ser diabólico, mas sim um ser esperto e ágil que gostava de brincar com átomos e moléculas, suscitando uma interpretação diferente da segunda lei da termodinâmica.

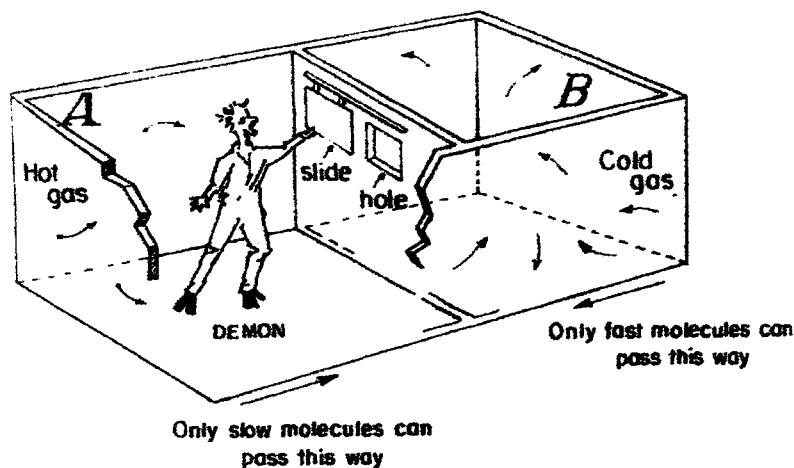


Figura 43: Demónio de Maxwell ⁵

Costa (2005) relata as brincadeiras do demónio de forma absolutamente esclarecedora, vejamos:

O pequeno demónio gostava de brincar no interior de um recinto que continha um gás e que estava dividido em dois lados iguais, através de uma porta colocada a meio. O lado esquerdo do recinto seria o lado A e aqui, as moléculas do gás agitar-se-iam mais depressa do que no lado direito, denominado lado B. Atendendo à preciosa informação de que quanto maior fosse a agitação molecular média (maior energia interna) maior seria a temperatura a que o gás se encontrava, o demónio sabia que se tivesse frio bastava passar para o lado A, visto este ser o lado a temperatura mais elevada. Claro que, sendo o número de moléculas de um lado e de outro tão elevado, as moléculas do lado A agitavam-se mais depressa do que as do lado B, apenas em termos médios. Ou seja, apesar da maioria das moléculas do lado A possuírem maior energia cinética do que a maioria das moléculas do lado B, algumas das moléculas do lado A agitar-se-iam com menos vigor do que algumas moléculas do lado B. Esta situação, prevista pela distribuição das velocidades moleculares de Maxwell, proporcionava um grande divertimento ao diabrete.

A brincadeira do demónio de Maxwell consistia em observar atentamente todas as moléculas, de modo a conhecer os percursos e as velocidades de cada um deles. Assim que dava conta de que uma

⁵ Imagem retirada da tese de mestrado de Inês Costa, Um Romance da Entropia: contributo para a construção de uma narrativa histórica com valor pedagógico (2005, p.225)

molécula do lado A possuía uma velocidade menor do que a velocidade média das moléculas do lado B, abria a porta que dividia o recinto e permitia a passagem da molécula de A para B. Da mesma forma, assim que se apercebia de que uma molécula do lado B se agitava com uma velocidade maior do que a velocidade média das moléculas do lado A, abria a porta e permitia a passagem desta molécula de B para A. Maxwell concedia outra característica muito especial ao seu demónio e respectivo recinto de brincadeiras. Para permitir a passagem das moléculas de um lado para o outro, os pequenos e ágeis dedos do diabinho, conseguiam abrir e fechar uma porta que não tinha massa. Esta era mais uma vantagem para o diabo, pois uma porta sem massa permitia-lhe abri-la ou fechá-la, sem que tivesse de realizar trabalho.

No fundo, a incessante tarefa do diabrete consistia em arrumar os seus brinquedos que eram as moléculas do gás, ordenando-as de acordo com a velocidade a que se agitavam. No lado A ficariam as moléculas que se agitavam com uma menor velocidade. No final da tarefa obtinha algo curioso que jamais havia sido conseguido espontaneamente; o lado A tornava-se ainda mais quente do que estava inicialmente e o lado B ficava ainda mais frio. Por não exigir a realização de trabalho, o processo ocorria espontaneamente. Esta era a brincadeira favorita do demónio de Maxwell e compreende-se o motivo. No final, ele conseguia a impressionante tarefa de aquecer o seu copo de leite morno que se encontrava no lado A do recinto, sem utilizar qualquer fonte de energia externa e conseguia, também espontaneamente, arrefecer ainda mais o seu copo de sumo com cubos de gelo, que se encontrava no lado B.

O demónio conseguia promover inúmeras situações dignas de um mágico. Confiando na sua agilidade, seria para si um deleite separar dois líquidos corados que se haviam misturado num recipiente. Se um dos líquidos fosse amarelo e o outro azul, a ágil criatura apenas teria que juntar as moléculas do líquido amarelo num lado do recipiente e as moléculas do líquido azul no outro lado. O resultado macroscópico seria a separação espontânea das suas cores. (pp.224 - 226)

Como vimos, este ser demoníaco tinha a capacidade de promover situações absolutamente inesperadas. Mais tarde, numa carta enviada ao físico inglês John Strutt, Maxwell propôs que as aventuras demoníacas se estendessem a todo o universo. De acordo com Smith, citado por Costa (2005, p.226), o excerto que se segue fazia parte do conteúdo da carta:

Se este mundo é simplesmente um sistema dinâmico e se se inverter o movimento de cada partícula cuidadosamente ao mesmo tempo, então todos os acontecimentos ocorrerão ao contrário(...) as pingas de chuva reunir-se-ão no chão e erguer-se-ão até às nuvens e os homens verão todos os seus amigos passarem da sepultura para o berço até nós próprios voltarmos ao nascimento...

Recorrendo, mais uma vez às palavras de Costa (2005):

(...) o pequeno demónio não conseguia cumprir a tarefa de mudar o rumo de todas as moléculas do universo simultaneamente. A única forma do diabrete conseguir a consecução da empreitada seria a de convocar um batalhão de demónios iguais a si, que o ajudassem a manipular as moléculas. (...)

O batalhão de pequenos diabretes poderia simplesmente ocupar-se de uma parte do universo, manipulando as moléculas desse sistema, que se moviam ao acaso, de forma a que passassem todas a mover-se na mesma direcção e no mesmo sentido. Quando extenuados, acabassem esta tarefa, poderiam gabar-se de terem realizado trabalho sem dissipar energia e como recompensa, assistiriam a um espectáculo que os faria rir com gargalhadas demoníacas. Os demónios conseguiam, por exemplo, fazer com que uma rocha de grandes dimensões subisse uma colina espontaneamente. A bizarra situação seria possível desde que as moléculas da rocha se encontrassem todas ordenadas no sentido ascendente da colina, tarefa fácil para os demónios! (pp.226, 227)

O imaginativo cientista escocês não acreditava que os simpáticos demónios, como o seu, pudessem efectivamente existir. Para além disso, também não acreditava que o Homem fosse capaz de conceber meios para manipular moléculas em seu benefício. Então porque os criou?

Maxwell visava mostrar que as caricatas situações “criadas” pelos astutos demónios não eram impossíveis, mas apenas altamente improváveis. Tal concepção indica-nos que para este cientista, ao fazer-se a análise da segunda lei da termodinâmica de uma perspectiva microscópica, esta adquiria um estatuto diferente do que era habitual. Maxwell, ao conferir uma natureza diferente à segunda lei da termodinâmica, pretendia realçar que no mundo dos átomos e das moléculas apenas se pode falar em probabilidades e nunca em certezas. Neste domínio, onde a estatística dita as suas leis e o obvio não existe, alguns desvios àquilo que se espera ser mais provável podem suceder e o inesperado pode ocorrer. Estes desvios são denominados de flutuações. Quando se tratam de grandes amostras são menos prováveis e, quando existem, o mais provável é que se trate de um pequeno desvio.

Para uma maior e melhor compreensão do que acabámos de referir, considerem-se os seguintes excertos de Costa (2005):

(...) Quando uma chávena de café se encontra exposta ao ar, dá-se uma transferência de energia sob a forma de calor do café para o ambiente. Como resultado desta transferência, as moléculas do sistema quente passam a movimentar-se mais lentamente, enquanto as moléculas do sistema frio passam a movimentar-se mais rapidamente. A transferência cessa quando as moléculas do café e do ambiente se movem com velocidades médias iguais. Macroscopicamente, o resultado é o esperado; o café arrefece, o meio que o rodeia aquece e ambos ficam à mesma temperatura ao fim de algum tempo. (p.228)

(...) Considere-se que o café corresponde ao lado A do recinto diabólico, enquanto que o ambiente que rodeia o café corresponde ao lado B. O mais provável será pensar que, ao fim de algum tempo as moléculas de ambos os lados do recinto se movem com velocidades médias iguais. Macroscopicamente, é muito provável que, ao fim de algum tempo, o sistema se encontre a uma temperatura uniforme. No entanto, pode ocorrer um desvio a esta probabilidade, uma flutuação, em que as moléculas com maior energia cinética se separam das de menor energia cinética, de acordo com a brincadeira do demónio. Tal situação nunca se verificou, pelo menos nunca ninguém deu conta de que o seu café quente aquecesse ainda mais, espontaneamente. Para que todas as moléculas se separassem por velocidades a flutuação teria que ser muito grande. Além de tal flutuação, correspondente à organização de todas as moléculas, ser muito pouco provável, o facto do sistema em jogo ser constituído por um enorme número de partículas, ainda a torna mais improvável. Por outro lado, mesmo que tal ordenação molecular fosse possível, demoraria apenas alguns segundos, pois os choques entre moléculas depressa reverteriam a situação. Esta separação molecular pode ocorrer para apenas algumas das partículas, constituindo uma flutuação menor e consequentemente mais provável, no entanto, macroscopicamente não se reflecte qualquer efeito. (p.229)

A contribuição dada por Maxwell para a interpretação estatística da segunda lei da termodinâmica foi deveras notável. Porém, na sua abordagem não recorreu ao enigmático conceito de entropia que, recorde-se, fora introduzido por Clausius.

Faltava agora aguardar pelos estudos de um físico austríaco que, penetrando no mundo dos átomos e das moléculas, acabou por levar mais longe a exploração da segunda lei, conferindo-lhe uma quantificação mais universal.

3.4. Boltzmann explica a misteriosa entropia

«O jazigo de Boltzmann, no cemitério central de Viena, está referenciado por um monumento em que se encontra gravada a fórmula

$$S = k \log W \text{ »}$$

Pais⁶

⁶ Excerto retirado do livro de Abraham Pais, *Subtil é o Senhor – Vida e Pensamento de Albert Einstein* (2004, p.83)

A misteriosa entropia, que emergiu pelas mãos de Clausius, foi brilhantemente interpretada e desmistificada por Boltzmann. Enquanto que Clausius a definiu como uma grandeza macroscópica, Boltzmann deslindou o enigma que envolvia a entropia, relacionando-a com os caóticos movimentos das moléculas e dos átomos.

A equação $S = k \log W$, em que S representa a entropia, k a constante de Boltzmann e W a probabilidade de um acontecimento, traduz a grande conclusão alcançada por Boltzmann⁷. Esta relação correspondeu a um dos maiores avanços da ciência do século XIX, contribuindo decisivamente para a interpretação do significado microscópico da entropia. A essência desta relação reside no facto da segunda lei da termodinâmica só poder ser compreendida em termos da conexão entre entropia e probabilidade. A partir da mesma, podemos aceder ao teor da reflexão de Boltzmann: quanto maior for a probabilidade de um acontecimento, maior é a entropia do mesmo. Ao estado mais ordenado e menos provável de um sistema associa-se uma baixa entropia e ao estado desordenado e mais provável associa-se uma alta entropia.

A probabilidade de um acontecimento corresponde ao número de arranjos moleculares que podem ocorrer num sistema, sem alterar as suas propriedades externas, mantendo, portanto, o aspecto macroscópico inalterável. Considerando a probabilidade como a medida de variedades de configurações que as moléculas podem tomar, pode fazer-se a correspondência entre probabilidade e desordem. A probabilidade é maior e mais desordenado fica o sistema, quanto maior for o número de arranjos que as moléculas, entre si, podem tomar. Desta forma, em vez de se afirmar que quanto maior for a *probabilidade* do estado de um sistema, maior é a sua *entropia*, poder-se-á dizer que quanto maior for a *desordem* de um sistema, maior é a sua *entropia* (Costa, 2005, p.242). Boltzmann mostrou que à escala microscópica, a entropia mede a desordem das moléculas e dos átomos. A entropia é a desordem, aumentar a entropia é aumentar a desordem!

⁷ Apesar de ter chegado a esta conclusão, o cientista austríaco não foi o autor desta formulação matemática. De acordo com Szilard, citado por Pais (2004, p. 83), «é irrelevante que Boltzmann nunca tenha escrito a equações sob esta forma. Isso foi feito por Planck [...] A constante k foi primeiro introduzida por Planck, e não por Boltzmann.»

Boltzmann anunciou que não há acção conhecida que não leve à desordem molecular do Universo. O aumento de entropia do Universo é um princípio que parece aplicar-se a muitas situações. Todos constatamos diariamente a tendência do mundo para a desarrumação, para o aumento de entropia. Basta, para isso, não arrumar o quarto onde se dorme e o escritório onde se trabalha.

Em vários processos, como por exemplo, a ordenação de um baralho de cartas de acordo com os diferentes naipes; a construção de uma casa; a arrumação de um quarto ou de um escritório; é possível assistir a estados mais ordenados. Nestas situações verifica-se uma diminuição de entropia. Confuso? O princípio da entropia é posto em causa? Não. Vejamos:

O esforço dispendido para a realização destas tarefas implicou dissipação de energia e, conseqüentemente, desordem. Se numa parte do sistema a entropia diminuiu, noutra parte registou-se um aumento que compensou a diminuição. Portanto, no total, a entropia aumentou.

Até hoje nunca se assistiu a qualquer processo que provocasse a diminuição da entropia total do Universo. Existe sempre um esforço dispendido que conduz a uma dissipação de energia, a uma desordem molecular, verificando-se um aumento de entropia que supera a diminuição causada pela ordenação. O mundo tende, portanto, espontaneamente para a desordem.

Com efeito, como destaca Allègre (2005, p.207), é em virtude do princípio de entropia que quando se junta água e vinho eles se misturam. A mistura é mais desordenada do que os dois líquidos separados.

Se pensarmos agora no caso de um prato de sopa que se encontra em cima de uma mesa, verificamos que ao fim de algum tempo, ocorre uma transferência de energia sob a forma de calor da sopa para o ambiente que a rodeia e que se encontra a uma temperatura mais baixa. Esta transferência de energia cessa quando é atingido o estado de equilíbrio térmico, ou seja, quando a sopa e o meio circundante ficam à mesma temperatura. O estado de equilíbrio térmico é o mais desordenado. É atingido quando as moléculas da sopa e do meio circundante se agitam com a mesma velocidade. Tal como em alguns dos exemplos anteriores, parte do sistema sofre uma diminuição de entropia, no entanto, a entropia total do sistema (formado pela sopa e pelo meio ambiente)

aumenta. Após a transferência de energia, a agitação das moléculas da sopa diminui, passam a mover-se mais ordenadamente, e a entropia diminui. Contudo, o aumento da entropia global do sistema é garantido pelo meio que circunda o prato de sopa, cujas moléculas passam a mover-se mais rapidamente e mais desordenadamente.

A desordenação do mundo microscópico leva a que a entropia aumente, validando assim, a asserção de Clausius de que a entropia do Universo tende para um máximo. Boltzmann demonstrou que a possibilidade de violar a segunda lei da termodinâmica é tão reduzida que ninguém assistirá a tal façanha.

Segundo Allègre (2005, p.207), Boltzmann declarou que, espontaneamente, a Natureza ama a desordem e que a ordem e a organização são «antinaturais». De acordo com o mesmo autor, esta declaração provocou uma verdadeira fúria contra o cientista, e logo a seguir contra a teoria atómica. O mundo da ciência levantou-se contra Boltzmann, questionando-o: Como pode a natureza «amar» a desordem?

Mach e Ostwald, foram dois dos mais virulentos oponentes, sobretudo porque consideravam que Boltzmann recorria a entidades, átomos e moléculas, que não pertenciam ao mundo da realidade. Maxwell, um atomista convicto, não acreditava na entropia em constante crescimento. Max Planck foi também, numa primeira fase, um céptico confesso e um feroz adversário da concepção de Boltzmann (Allègre, 2005, p.207).

Allègre (2005, p.208) refere que este génio incompreendido pediu para que fosse escrito no seu túmulo «O Homem que inventou a entropia». O que sucedeu muito mais tarde e em homenagem póstuma.

3.5. Chegados ao átomo – Os novos raios e o electrão, descobertas que marcaram o final do século XIX

«Na segunda metade do século XIX, com relevância especial para as três últimas décadas, assistiu-se a uma explosão fulgurante de aplicações técnicas da ciência, particularmente da Física, mas também da Química. Pode caracterizar-se esta fase como uma “segunda revolução industrial”, em seguimento da revolução baseada na máquina a vapor. É a era da tecnologia e da electricidade a iluminar

as casas e as ruas, a substituir a força dos motores a vapor, a invadir os transportes públicos, a dar origem às comunicações "instantâneas", como o telefone, a telegrafia sem fio, etc.»

Manuel Fernandes Thomaz⁸

O século XIX correspondeu ao período em que a Física, tal como a conhecemos hoje, passou a existir. O sucesso atingido por esta ciência foi de tal magnitude que, à medida que se aproximava o final desse século, muitos cientistas sentiam que todas as questões importantes envolvendo a Física tinham sido resolvidas. Neste sentido, ficou sobejamente conhecida a metáfora utilizada por William Thomson (Lorde Kelvin). Segundo este, apenas duas pequenas nuvens, o éter e a radiação do corpo negro, ensombrevam a Física dos finais do século XIX. De acordo com Videira (1997), numa conferência realizada no dia 1 de Dezembro de 1924, Max Planck relembra que:

Quando comecei meus estudos de física (em 1874, em Munique) e procurei aconselhar-me com o meu venerável professor Philipp von Jolly... ele descreveu-me a física como uma ciência altamente desenvolvida, quase que totalmente madura... Era possível que num ou noutro recanto talvez houvesse uma partícula de poeira ou uma pequena bolha a serem examinadas e classificadas, mas o sistema, como um todo, erguia-se razoavelmente firme, e a física teórica manifestamente se aproximava daquele grau de perfeição, que, por exemplo, a geometria já detinha há séculos. (p.VIII)

Porém, a derradeira década do século XIX foi de tal modo fecunda em novas descobertas que, assim o destaca Thomaz (2002, p.21), a sensação de fim de percurso expressada por alguns físicos se desvaneceu, dando lugar a um fervilhar de novas hipóteses e teorias explicativas para os recentes fenómenos encontrados. As descobertas dos raios X, da radioactividade e do electrão contribuíram para a mudança dos pressupostos conceptuais até então vigentes e vieram colocar os desafios que incentivaram os físicos a desbravar novos e fascinantes caminhos, abrindo uma ampla janela sobre o mistério do átomo.

Segundo Carvalho (1975, p.108), os estudos que se relacionam com as descargas eléctricas no interior de tubos em que o ar foi rarefeito, isto é, em que o ar se encontra a pressão muito fraca (tubos de raios catódicos), iniciados no século XVIII, começaram a ter grande desenvolvimento a partir de 1857 e interessaram vivamente alguns dos

⁸ Excerto retirado do artigo de Manuel Fernandes Thomaz, A Física no Fim do Século XIX (2002, p.21)

nomes mais ilustres do século XIX. Cientistas de nomeada interessaram-se por este assunto, entre os quais, Plucker (1801-1868); Hittorf (1824-1914); Crookes (1832-1919); Perrin (1870-1942); entre outros.

De acordo com Carvalho (1975, p.115), as experiências realizadas permitiram concluir que o interior dos tubos com o ar rarefeito (figura 44), instalados no circuito eléctrico, é percorrido por uma radiação que se dirige do cátodo (condutor, soldado ao tubo de vidro, que se põe em comunicação com o pólo negativo da fonte de electricidade) para o ânodo (condutor, soldado ao tubo de vidro, que se liga ao pólo positivo).

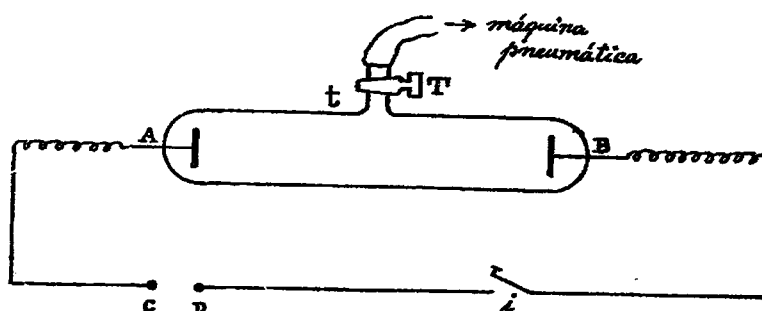


Figura 44: Representação esquemática de um tubo destinado ao estudo dos efeitos das descargas eléctricas no seio dos gases rarefeitos⁹.

De entre o grande número de experiências que se realizaram na segunda metade do século XIX para desvendar os mistérios que se passavam no interior dos tubos com gases rarefeitos, o nosso destaque vai, ainda que muito breve, para a descoberta dos raios X e para a descoberta do electrão.

De acordo com Carvalho (1975, p.131), no dia 8 de Novembro de 1895, Wilhelm Roentgen, então professor de física e director do Instituto de Física de Würzburg, no decurso das suas experiências relativas ao estudo dos raios catódicos, descobre, acidentalmente (ver Rómulo de Carvalho, *História do átomo*, pp.131-139), uma misteriosa radiação – os raios X.

⁹Imagem retirada do livro de Rómulo de Carvalho, *História do átomo*, (1975, p.111). “Os terminais C e D ligam-se à fonte de energia eléctrica. A tubuladura t permite pôr o tubo em comunicação com uma máquina pneumática. Fechando o interruptor i, e começando a rarefazer o ar no interior do tubo, observam-se, a partir de certo estado de rarefacção, efeitos luminosos, particulares, entre os discos metálicos A e B.” (Carvalho, 1975, p.111).



Figura 45: Wilhelm Roentgen (1845-1923) ¹⁰

Segundo Videira (1997), Roentgen anunciou no seu primeiro trabalho sobre o assunto que:

Se se permitir que a descarga de um enrolamento de indução de Rühmkorff bastante grande atravessasse um tubo de vácuo de Hittorf... e se se revestir o tubo com um invólucro bastante justo de fino cartão preto, observa-se, no aposento completamente escurecido, que uma tela de papel pintado com platinocianeto de bário, colocada perto do dispositivo, brilha intensamente ou torna-se fluorescente com cada descarga, não importando se a superfície pintada ou o seu outro lado está virada na direcção do tubo de descarga. Essa fluorescência permanece visível a uma distância de dois metros do aparelho. É fácil provar que a causa da fluorescência provém do dispositivo de descarga e não de qualquer outro ponto do circuito de condução. (p.3)

Após a sua descoberta inicial, continuou a investigar meticulosamente as características da radiação que apelidou de Raios X. Esta descoberta surpreendeu e abalou o mundo. Estávamos na presença de novos e misteriosos raios que conseguiam atravessar materiais sólidos, impressionando filme fotográfico. Pouco tempo depois, gente de todo o mundo maravilhava-se a olhar para fotografias que mostravam os ossos das suas mãos (Mackintosh et al., 2003, p.23)

¹⁰ Imagem retirada do site: <http://ressources2.techno.free.fr/informatique/sites/inventions/images/roentgen.gif>



Figura 46: Imagem de uma mão com um estilhaço¹¹

Os enigmáticos raios X pareciam jorrar de uma parte do tubo que, no escuro, ficava fluorescente. Esta propriedade deu o mote para que Antoine Henri Becquerel, no dia 1 de Março de 1896, descobrisse a radioactividade.



Figura 47: Antoine Henri Becquerel (1852-1908)¹²

¹¹ Os raios X atingiram o máximo reconhecimento durante a primeira Guerra Mundial. Imagem retirada do livro de Mackintosh et al., *Núcleo – Uma viagem ao coração da matéria* (2003, p.22). Esta imagem constava do livro de Marie Curie, *Radiologia na Guerra*.

¹² Imagem retirada do site: <http://www.schoenitzer.de/Radioaktivitaet.html>

Videira (1997, p.14) refere que Becquerel, lembrando-se da longa associação da sua família com a fosforescência de sais urânicos, questionou-se se essa radiação fosforescente conteria raios X. Foi precisamente a partir da associação entre raios X e compostos de urânio, que permitiu a Becquerel descobrir a radioatividade tão pouco tempo após o anúncio dos raios X feito por Roentgen. Citando Videira (1997), Becquerel anunciou a sua descoberta da seguinte forma:

O novo efeito que se encontra “fora dos fenómenos que se esperaria encontrar” pode ser devido a “radiação fosforescente invisível, emitida com uma persistência infinitamente maior do que a persistência da radiação luminosa.” (p.16)

A radiação encontrada por Becquerel também conseguia atravessar o papel preto que protegia o filme fotográfico da luz e deixar a sua marca no filme ainda por revelar. Contrariamente aos raios X, que desapareciam quando o tubo de raios X era desligado, a radiação do urânio era emitida continuamente.

Durante um certo período, apenas o urânio e os seus compostos eram conhecidos por emitirem esta nova radiação. O impacto da descoberta de Becquerel, contrariamente ao que sucedera com Roentgen, não foi amplo nem imediato. Porém, já em 1897, havia quem se dedicasse afincadamente ao assunto, em particular, o Casal Curie. Pierre e Marie Curie descobriram, entretanto, outros elementos radioactivos como o tório, o plutónio e o rádio.

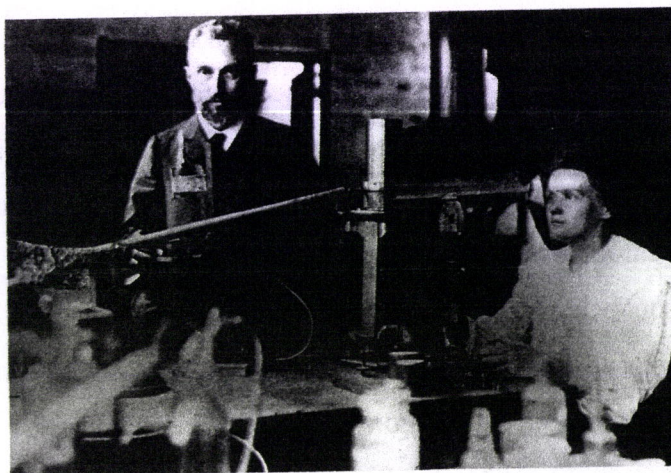


Figura 48: Pierre (1859-1906) e Marie Curie (1867-1934), no seu laboratório em 1898 ¹³

¹³ Imagem retirada do livro de Mackintosh et al., *Núcleo – Uma viagem ao coração da matéria* (2003, p.25).

De acordo com Mackintosh et al. (2003, p.24) e Videira (1997, p.21), a expressão “substância radioactiva” surgiu pela primeira vez, em 1898, num trabalho publicado por Pierre e Marie Curie, onde estes descreveram a radiação emitida pelo urânio e pelo tório. No mesmo ano, publicaram um outro artigo, onde relacionaram explicitamente, também pela primeira vez, a radioactividade com átomos individuais.

Por volta desta altura foi-se tornando mais evidente que os fenómenos radioactivos também tinham de ser explicados em termos da divisibilidade dos átomos.

Segundo Pais (2004, p.113), Marie Curie escreveu em 1900 que «Os átomos [de elementos radioactivos], indivisíveis sob o ponto de vista químico, são divisíveis aqui», acrescentando que a explicação da radioactividade em termos da expulsão das partículas subatómicas «mina seriamente os princípios da química».

Até aos últimos anos do século XIX, a grande maioria dos físicos, para não dizer todos, que admitiam a realidade atómica partilhavam a opinião de Maxwell de que as partículas permaneciam imutáveis e frias (ver p.141). Apesar disso, e como salienta Pais (2004, p.113), muitos destes físicos, Maxwell inclusive, «estavam convencidos de que alguma coisa tinha que mexer no interior do átomo para poderem ser explicados os espectros atómicos». Contudo, para estes, a separação do átomo parecia não ser possível. Entretanto, em Cambridge, decorria o ano de 1897, o maior físico experimentalista da altura, J. J. Thomson, ao estudar a radiação emitida no tubo de raios catódicos, chegou à conclusão de que o átomo de hidrogénio não era, como se julgava até à essa data, a partícula de menor massa que existe na Natureza. Havia outra muitíssimo menor – a partícula constituinte da radiação catódica, a que hoje chamamos electrão. Segundo Carvalho (1975, p.122), a descoberta do electrão ficou a dever-se ao génio de J. J. Thomson, que aliando a técnica à indispensável matemática conseguiu determinar a massa e a velocidade de cada uma dessas pequeníssimas partículas que constituem os raios catódicos.

J. J. Thomson beneficiou dos trabalhos de Plucker. Segundo Carvalho (1975, p.119), este último ao aproximar um íman da radiação catódica, verificou que esta se deslocava quando o íman se deslocava, o que significava que os raios catódicos tinham sido desviados pelo íman. O conhecimento desta propriedade permitiu que se admitisse que os raios catódicos não eram como os raios da luz, uma vez que um feixe de luz não era desviado do seu trajecto quando se lhe aproximava um íman. Estes raios passaram, então, a ser associados a pequeninos corpúsculos, partículas muito subtis que se

deslocavam rapidamente dentro do tubo, no sentido do cátodo para o ânodo e que se poderiam mover em virtude da grande rarefação em que se encontrava o interior do tubo. As questões que se levantaram na época acerca destas partículas, “Que massa terão?”; “Serão átomos?”; “Mas átomos de quê?”; “E como saber se são átomos?”, serviram de mote para que J.J. Thomson determinasse a massa de cada uma destas partículas e verificasse que era consideravelmente mais pequena que a massa de um átomo de hidrogénio.

De acordo com Videira (1997, pp. 34, 35), no dia 30 de Abril do mesmo ano, numa conferência proferida na *Royal Institution*, Thomson afirmou que «a hipótese de que os raios catódicos sejam partículas carregadas deslocando-se a alta velocidade [decorre] que o tamanho dos transportadores [de carga] deve ser pequeno comparado com as dimensões de átomos ou moléculas comuns. A suposição de um estado da matéria mais finamente subdividido do que o átomo é algo surpreendente...».

As provas que indiciavam o fim da indivisibilidade do átomo pareciam ser bastante credíveis. Segundo Pais (2004, p.13), dois anos após a descoberta do electrão, Thomson terá argumentado em favor da divisão do átomo que: «A electrificação [isto é, ionização] envolve, essencialmente, a divisão do átomo, uma parte da massa do átomo torna-se livre e separa-se do átomo original.»

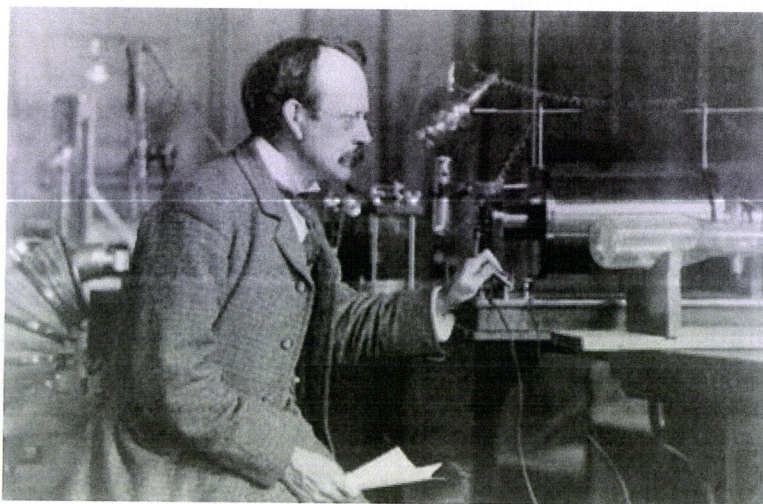


Figura 49: Joseph John Thomson (1856-1940) ¹⁴

¹⁴ Imagem retirada do site: <http://www.fnal.gov/pub/inquiring/timeline/02.html>

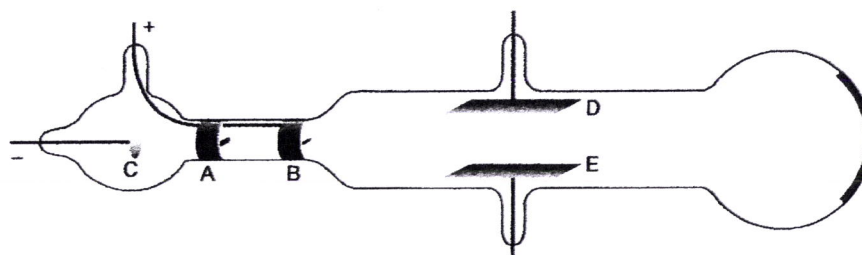


Figura 50: Dispositivo com o qual Thomson descobriu o electrão¹⁵. Este dispositivo é um precursor do tubo de raios catódicos que se encontra nos monitores dos computadores e nos aparelhos de televisão. Raios emitidos pelo “cátodo” C, atingem o alvo fluorescente na zona oposta do tubo, deixando um ponto luminoso. A genialidade deste cientista foi a de interpretar os percursos dos raios catódicos em termos de corpúsculos carregados, mais tarde chamados electrões. Os eléctrodos A e B estavam colocados a uma tensão positiva, deixando passar os electrões através das fendas. Estes eram então encurvados pelos campos eléctricos e magnéticos. Os eléctrodos D e E forneciam os campos eléctricos e bobinas externas providenciam os campos magnéticos. (Mackintosh et al., 2003, p.23)

No virar do século XIX, surgiu uma nova vaga de cientistas convictos da realidade dos átomos e todos conscientes de que a química não constituía o último capítulo em física das partículas. As descobertas dos raios X, da radioactividade e do electrão não só marcaram, como revolucionaram este final de século. Os protagonistas destas descobertas, e em virtude das mesmas, foram recipientes do prestigiado Prémio Nobel da Física. Roentgen foi o primeiro (não só deste grupo de cientistas, mas de todos) cientista a recebê-lo, em 1901; Becquerel dividiu, em 1903, o prémio com o casal Curie; Thomson foi galardoado em 1906.

Terminou um século e com ele toda uma maneira de encarar a física. O século que se seguiu trouxe consigo uma tremenda revolução e uma nova forma de ver a física. As duas pequenas nuvens, anunciadas por Lorde Kelvin no século anterior, estariam na origem das duas traves mestras – relatividade e física quântica – do novo edifício do pensamento científico, que tão radicalmente veio alterar a nossa concepção do mundo. Da pequena nuvem da radiação do corpo negro viria a nascer, em Março de 1905, graças ao trabalho de Einstein sobre o efeito fotoeléctrico, a física quântica (refira-se que foi Planck quem abriu caminho à revolução quântica, ao propor, em 1900, uma explicação para a radiação do corpo negro). A pequena nuvem do éter estaria na génese da Teoria da Relatividade Restrita, apresentada por Einstein em Junho de 1905.

¹⁵Imagem retirada do livro de Mackintosh et al., *Núcleo – Uma viagem ao coração da matéria* (2003, p.23)

3.6. Conflito científico-filosófico no final do século XIX

«Tal como o princípio da conservação da energia ocupa o primeiro lugar entre as leis dinâmicas, do mesmo modo o segundo princípio é o mais importante entre as leis estatísticas»

Planck¹⁶

Por volta de 1900, as evidências indirectas da existência de átomos, derivadas da química e da teoria cinética dos gases, bem como outros desenvolvimentos, tais como as emergentes teorias do "calor" e da electricidade, tornaram-se convincentes. No entanto, alguns cientistas recusaram aceitar o que os seus sentidos não lhe revelavam directamente. Nessa época, jogou-se precisamente uma forte querela entre antiatomistas e atomistas. De um lado, a relutância dos que desconfiavam de toda a descrição da natureza onde se fazia apelo aos átomos (e às moléculas) que ninguém conseguia ver. Ostwald e Mach eram dois dos seus expoentes máximos. Do outro, destacavam-se nomes como os de Maxwell e Boltzmann para quem os modelos microscópicos se tinham tornado necessários.

Para Pierre-Gilles de Gennes (1991, p.9), este género de conflito é frequente ao longo da História das Ciências. Dois campos são opostos (um pelo movimento, outro contra) e cada um dos campos tem razão num determinado momento. Segundo o mesmo, durante uma boa parte do século XIX, foi prioritário desenvolver uma descrição puramente fenomenológica da matéria, fundamentada na mecânica, na termodinâmica e no electromagnetismo. Era então preferível evitar os modelos *fabricados* com os átomos ou com moléculas por três razões:

a) A linguagem requerida para uma descrição à escala dos átomos não era necessariamente a mesma utilizada para elucidar o movimento dos pêndulos e dos planetas;

b) A análise ao nível dos átomos não podia fazer-se senão sobre sistemas muito rústicos ou idealizados como os gases perfeitos;

c) Os atomistas invocavam os átomos, mas não sabiam quantos havia num determinado espécime.

¹⁶ Citado por Valente (1999, p.430)

Todas estas relutâncias em relação aos modelos atômicos eram compreensíveis. No entanto, e em poucos anos, elas perderam a sua justificação, quando experiências bem sucedidas convergiram em direcção a um valor preciso de N , quer dizer, em direcção a um dado incontornável na discussão sobre a existência dos átomos (acrescente-se ainda, que durante o mesmo período, se registou um progresso análogo no domínio das cargas eléctricas).

De acordo com Stachel (2005, p.86), Ostwald, um dos fervorosos adversários da teoria atômica, defendia o *paradigma energeticista*¹⁷ em detrimento do *paradigma atomista*. Este autodenominava-se *energeticista* para salientar que considerava o conceito de energia como o mais fundamental conceito ontológico da ciência.

A favor da vertente antiatomista de Ostwald jogava um argumento de peso – *não havia evidências experimentais directas que comprovassem a existência de átomos*. Contudo, segundo Asimov (2004, p.26), Ostwald admitia que o atomismo funcionava, mas os átomos representavam uma verdade muito mais complicada, aconselhando prudentemente a que não se levasse os átomos demasiado à letra.



Figura 51: *Wilhelm Ostwald* (1853-1932)¹⁸

No final do século XIX, Ostwald não estava só na *luta* contra a teoria atômica. Outro dos expoentes máximos do cepticismo atômico era Ernst Mach.

¹⁷ Citando Thomaz (2002, p.18):

«A importância do conceito de energia foi ao ponto de se chegar a admitir que a matéria não existia na realidade e que a energia era suficiente para se ter uma compreensão completa do universo. A matéria não seria mais do que o conteúdo que enche a energia cinética; a sua impenetrabilidade seria a sua energia de volume; o seu peso a energia de posição; o próprio espaço só nos seria acessível através do gasto de energia necessário para o penetrar.»

¹⁸ Imagem retirada do site: http://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Ostwald



Figura 52: Ernst Mach (1838-1916) ¹⁹

Pela mão de Baeyer (2000), podemos ver como Mach demonstrava a sua relutância em admitir a pertinência dos modelos microscópicos, átomos e moléculas, na explicação da natureza:

Atoms cannot be perceived by the senses ... they are things of thought" ... "molecules are merely a valueless image. (p.17)

Na melhor das hipóteses, ele admitia que a teoria atômica desempenhava uma parte na física similar a alguns conceitos em matemática. Tratava-se, pois, de um modelo matemático para facilitar a representação mental dos factos. De acordo com Baeyer (2000), Mach terá afirmado:

The atomic theory plays a part in physics similar to that of certain auxiliary concepts in mathematics; it is a mathematical model for facilitating the mental reproduction of facts. (p.17)

Apesar da sua posição hostil em relação à existência de entidades não directamente acessíveis à experiência sensorial, em particular os átomos, Mach admitia que o atomismo poderia ter uma utilidade heurística²⁰ ou didáctica.

De acordo com Valente (1998, p.490), Mach teve uma grande influência na formação de físicos importantes, no entanto, a luta que desenvolveu contra a teoria

¹⁹ Imagem retirada do site: http://en.wikipedia.org/wiki/Ernst_Mach

²⁰ De acordo com Eduardo Lage (2005, p.9), heurística é a arte de inventar e aqui tem o significado de ajudar na procura da solução de um problema, valendo como uma hipótese sem justificação.

atômica acabou por transformar alguns dos seus admiradores em críticos impiedosos. Foi o que aconteceu com Max Planck, cientista alemão.



Figura 53: Max Planck (1858-1947) ²¹

No texto referenciado, Valente pretende colocar em evidência algumas diferenças substanciais entre duas formas de pensar o conhecimento científico – *Mach, o construtivista* (também designado por empirista, positivista) *versus Planck, o realista-abstracto* (um pouco à maneira dos pintores abstractos do início do século XX, para quem existe uma realidade invisível mas à qual se poderá aceder). O grande ponto de discórdia entre Mach e Planck centrava-se em torno da crença na realidade dos átomos.

Mach, cuja Filosofia da Ciência influenciou o pensamento científico na segunda metade do século XIX, inseria-se na linha de uma física essencialmente descritiva. Para ele, o que estava em jogo era um aumento de coerência entre concepção e percepção, sendo que este aumento de coerência dependia, naturalmente, de um enriquecimento em experiências. Assim, considerava a experimentação como o pilar principal na construção do pensamento. Como até finais do século XIX e inícios do XX não havia provas directas da existência dos átomos, resultantes da experimentação, Mach considerava que a metafísica tomava forma na utilização da hipótese atômica.

Para Planck, por sua vez, as teorias desenvolviam-se progressivamente na tentativa de uma maior aproximação a uma realidade exterior, que permaneceria, no entanto, inacessível pela real impossibilidade de uma libertação total da esfera do sensível. Segundo a mesma fonte, Planck defendia que a realidade atômica era essencial

²¹ Imagem retirada do site: <http://en.wikipedia.org/wiki/Planck>

para o desenvolvimento de uma imagem unitária do mundo físico. O que Planck não podia aceitar em Mach era a ausência de uma imagem constante do mundo físico, independente dos tempos e das pessoas, que em Planck tomava forma através da ideia de unidade. Na verdade, ele aceitava mudar de ideias, algumas delas que considerava importantes, desde que lhe permitissem prosseguir numa constante actividade de unificação.

Para Planck, o modo de pensar de um físico devia ser incompatível com o “*pensamento económico*” de Mach. Considerava que a dimensão “*económica*”, bem patente na teoria do conhecimento desenvolvida por este último, esquecia todo o esforço imaginativo dos grandes cientistas, tanto na consideração de todos os detalhes possíveis dos efeitos das suas ideias, como no desenvolvimento de novas ideias.

A vida científica de Planck desenrolou-se, desde muito cedo, em torno da possibilidade de construção de uma imagem unitária para o mundo físico. Para tal, alicerçou a sua investigação em redor da evolução de dois princípios – *o princípio da conservação da energia e o segundo princípio da termodinâmica* – que considerava serem os instrumentos adequados rumo a uma direcção definida pelo pólo da unidade. Curiosamente, como refere Allègre (p.31), Planck confessou nas suas memórias ter ficado durante muito tempo reticente em relação à teoria atómica. Utilizando as palavras de Heilbron, referenciado no texto de Valente (1998, p.486), podemos afirmar que Planck foi “*atomiste à contre coeur*”. A sua definitiva adesão à realidade atómica surgiu com a emancipação do conceito de entropia dos artefactos experimentais dos homens e consequente elevação da segunda lei da termodinâmica a um princípio genuíno. Como o próprio Planck reconheceu, o passo decisivo foi dado por Boltzmann, que relacionou o conceito de entropia com o conceito de probabilidade. Planck, citado por Valente (1998) considerava que:

*...the calculation of the precise degree of probability for each condition of a system of bodies is made possible by the introduction of **atomic theory** and of the **statistical approach**. (p.486)*

Alguns textos de Planck demonstram o valor que atribuiu à natureza estatística da segunda lei da termodinâmica. Este cientista alemão estava de tal forma consciente desta tocar noutra tipo de comportamento da natureza, que veio afirmar uma unificação dos fenómenos, aspecto que perseguiu incessantemente, em fenómenos reversíveis

(mecânicos) e irreversíveis. Na seguinte passagem, podemos ver como Planck, citado por Valente (1999), se referia à natureza estatística da segunda lei da termodinâmica:

Smoluchowski conseguiu com efeito formular uma teoria estatística do movimento browniano do qual se podem deduzir as leis que regem a densidade de distribuição das partículas, as suas velocidades, o valor dos seus percursos e até o valor das suas rotações. Estas leis foram brilhantemente verificadas pela experiência, graças sobretudo aos trabalhos de Jean Perrin.

Para todos os físicos que crêem no valor do método indutivo, não há qualquer dúvida: a matéria possui uma estrutura atômica. O calor é idêntico aos movimentos das moléculas e a condutibilidade térmica, como todos os outros fenómenos irreversíveis obedece então às leis estatísticas, isto é às leis da probabilidade e não às leis da dinâmica. Na verdade, é extremamente difícil fazer uma ideia, mesmo aproximada, da incrível pequenez da probabilidade que existe, mesmo por um curto instante, do calor seguir a direcção inversa da habitual, ao passar, por exemplo, da água fria para o ferro quente. (p.427)

Para Planck, todas as leis que contavam com o acaso eram denominadas por leis estatísticas (os fenómenos irreversíveis, como a transferência de energia sob a forma de calor do «quente» para o «frio» eram associadas a leis baseadas na probabilidade). Por sua vez, todas as outras leis que não contavam com o acaso inseriam-se no grupo das leis dinâmicas. A partir do excerto seguinte, podemos verificar como este físico, citado por Valente (1999), estabeleceu relações que pretendiam realçar a elevada improbabilidade de certos acontecimentos:

Há os casos onde, mesmo em física, é conveniente tomar como séria consideração as probabilidades extremamente mínimas. Uma fábrica de pólvora pode explodir um belo dia sem que nenhuma causa exterior possa ser atribuída ao acidente. A uma inflamação deste género, dita espontânea, como se poderá atribuir outra causa que não seja a seguinte: uma acumulação de choques tão extremamente improvável entre moléculas susceptíveis de reagir quimicamente umas sobre as outras no sentido fatal. No entanto esta acumulação é facilmente regida pelas leis puramente estatísticas. Por exemplo, até que ponto é que nós compreendemos a necessidade de ser prudente ao empregar palavras como «certo» ou «indubitável», mesmo numa ciência exacta. Podemos assim apreciar por aqui o quão modesto é por vezes o alcance das leis experimentais.

Assim sendo, pelas razões retiradas, tanto da teoria como da prática, é indispensável estabelecer uma distinção fundamental entre as leis obrigatórias e aquelas que são simplesmente prováveis. Todas as vezes que alguém esteja na presença de uma lei, a primeira coisa a perguntar é a seguinte: esta lei é uma lei estatística ou uma lei dinâmica? (p.428)

A passagem com que iniciámos este subcapítulo, atribuída a Planck, traduz a grande distinção que este estabeleceu entre a primeira e a segunda lei da termodinâmica.

«Tal como o princípio da conservação da energia ocupa o primeiro lugar entre as leis dinâmicas, do mesmo modo o segundo princípio é o mais importante entre as leis estatísticas»

Valente (1988), no seguinte excerto, destaca que a adesão de Planck à hipótese atómica não foi, de todo, um passo fácil:

...Para chegar aqui Planck “sofreu” bastante, renunciando a aspectos que lhe eram muito caros, mas o seu sentido de rigor e a sua “crença” na unidade removeram montanhas, aproximando-o, como ele diria, da realidade. ... Esta aproximação à realidade pressupõe, portanto, a adesão à hipótese atómica, passo que não tinha sido dado por Mach. (p.487)

Mach não aceitou a generalização da segunda lei da termodinâmica, tal como foi feita por Planck. Do seu ponto de vista, era muito diferente falar da massa da Lua ou da massa de um átomo. O conceito de átomo não transportava consigo a evocação de uma qualquer experiência sensorial. Este aspecto fez de Mach um perdedor no terreno científico e, como é destacado no texto supracitado (p.497), talvez seja por isso que a sua obra seja hoje pouco discutida e, quando o é, transporta o rótulo de – *positivista*. Allègre (p.32) chega até a referir-se a alguns antiatomistas, entre os quais Mach, como “*positivamente prejudiciais*”.

Refira-se que, tal como menciona Purrington (1997, p.130), Ostwald rendeu-se ao atomismo, em 1908, após a explicação do movimento browniano protagonizada por Einstein. O mesmo autor acrescenta que essa rendição de Ostwald não se deveu apenas à explicação do movimento browniano, mas também às evidências experimentais retiradas dos raios catódicos e da radioactividade. De acordo com Pais (2004, p.135), Ostwald, reportando-se às experiências sobre o movimento browniano e sobre o electrão, afirmou que os resultados «autorizam mesmo o cientista cauteloso a falar de uma prova experimental da constituição atomística da matéria cheia de espaço».

Mach, o eterno céptico, morreu sem estar convencido da realidade atómica.

É certo que a discussão em torno da pertinência da teoria atómica está ultrapassada, particularmente desde os trabalhos experimentais levados a cabo por Perrin. No entanto, e segundo Allègre (2005, p.33), a convicção antiatómica teve vida

muito longa, nomeadamente em França, onde, como o mesmo refere, conheceu um professor de Química da Sorbonne que, na década de 50 do século passado, ainda se recusava a falar de átomos nos seus cursos, sob o pretexto de que ninguém os havia visto.

Capítulo 4 – A explicação do misterioso movimento e a afirmação do átomo enquanto entidade física

4.1. «Partículas dançantes» – um fenómeno curioso...

“A agitação molecular escapa à nossa percepção directa como o movimento das ondas do mar a um observador demasiado afastado. No entanto, se porventura algum barco se encontrar à vista, o mesmo observador poderá ver um balanço que lhe revelará a agitação que ele não imaginava. Também não se pode esperar, se se encontrarem partículas microscópicas num fluido, que essas partículas, ainda bastante grossas para serem seguidas através do microscópio, sejam bastante pequenas para serem consideravelmente agitadas por choques moleculares?”

Esta questão poderia ter-nos conduzido à descoberta de um fenómeno maravilhoso que nos foi revelada pela observação microscópica...

Jean Perrin¹

No período de transição entre os séculos XIX e XX assistia-se a uma tremenda batalha ideológica que opunha atomistas e antiantomistas. Apesar de, nessa época, a comunidade científica já possuir bastantes evidências indirectas da existência de átomos, um forte argumento, permanecia a favor dos antiatomistas – ninguém era capaz de ver os átomos ou de os detectar, fosse de que modo fosse. Pais (2004, p.114) salienta que, no meio desta querela, “se havia um tema sobre o qual existia acordo entre os físicos e os químicos, atomistas ou não, era o de que os átomos, se existissem, seriam demasiado pequenos para serem observados.” Contudo, há muito que se desenhara o decisivo contra-argumento atomista, a mais bela justificação da teoria atómica. Segundo Asimov (2004, p.23), tudo começou com a observação de um fenómeno curioso que nada parecia ter a ver com os átomos, feita por um cientista que não estava neles interessado.

De acordo com Pais (2004, p.114), em 1828, numa publicação intitulada “Uma breve descrição de observações microscópicas efectuadas nos meses de Junho, Julho e Agosto de 1827 sobre partículas contidas no pólen das plantas”, o botânico escocês Robert Brown relatou que ao usar um microscópio para estudar grãos de pólen (cujo

¹ Excerto retirado do livro de Jean Perrin, *Les atomes* (1991, p.133)

diâmetro é da ordem de alguns microns) suspensos em água, reparou que estes se moviam ligeiramente e de forma desordenada, como se estivessem a tremer. Os grãos de pólen descreviam complicadas trajectórias num movimento em ziguezague, sem, contudo, se afastarem muito da posição inicial.

Ao fenómeno descrito deu-se o nome de *movimento browniano*, em homenagem ao botânico escocês. Refira-se porém, que para partículas de grandes dimensões o fenómeno não era observado. Só se verificava em partículas de dimensões bastante pequenas, como por exemplo grãos de pólen e poeira. Hoje, podemos dizer que Brown terá observado a acção das moléculas de água a empurrar os grãos de pólen.



Figura 54: Robert Brown (1773-1858) ²

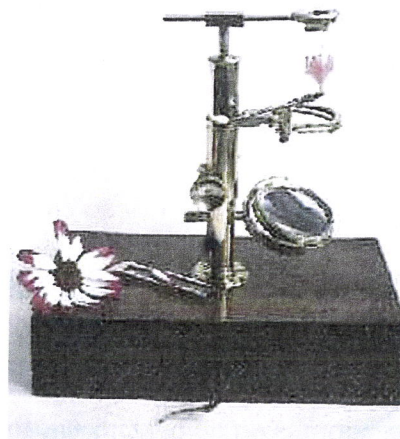


Figura 55: Microscópio utilizado por Brown ³

Stachel (2005, p.87) afirma que Brown não terá sido o primeiro a observar este fenómeno, mas sim o primeiro a efectuar meticulosas observações acerca do mesmo. Buffon e Spallanzani tiveram conhecimento do *misterioso movimento* mas, provavelmente devido à falta de bons microscópios, não compreenderam a sua natureza e classificaram as “partículas dançantes” como pequeníssimos animais rudimentares em suspensão na água.

² Imagem retirada do site: <http://www.abc.net.au/navigators/naturalists/default.htm>

³ Imagem retirada do site: <http://www.brianjford.com/wbbrownc.htm>

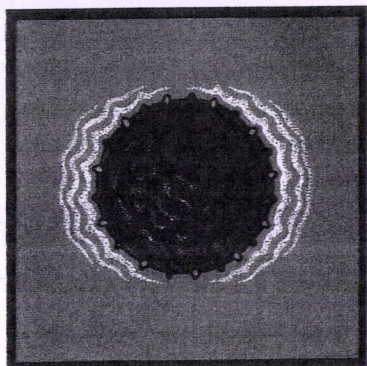


Figura 56: Imagem representativa da vibração de um grão de pólen em suspensão na água ⁴

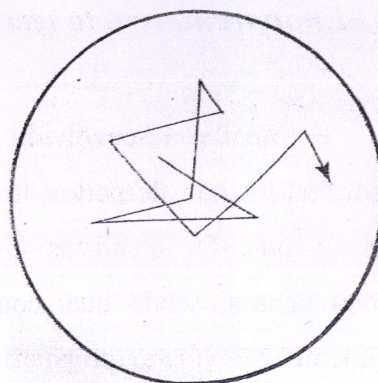


Figura 57: Esquema de uma possível trajectória descrita por um grão de pólen (ou por uma partícula de dimensões semelhantes) em suspensão na água. ⁵

Brown efectuou várias experiências com outros tipos de pólen e confirmou que, em todos os casos, os grãos se moviam daquela maneira. Como tal, admitiu, à priori, que estariam animados de vida. No entanto, repetiu a experiência com grãos de pólen obtidos de herbários (que tinham, pelo menos, um século de idade) e com partículas ínfimas de metal, vidro e carvão, tendo verificado que todas revelavam o mesmo comportamento errático. Constatou, também, segundo Santos (1946, p.53), que o mesmo fenómeno ocorria nas flutuações no ar de pequeníssimas partículas de pó. Assim, Brown concluiu que o *misterioso movimento* observado não se tratava de um fenómeno vital. Admitiu, portanto, que quaisquer corpos, desde que fossem levíssimos e colocados no seio de um fluído (líquido ou gás), ficavam possuídos de uma constante e desordenada movimentação, que aumentava com a diminuição do tamanho das partículas. Citando Perrin (1991):

Num dado fluído, a grossura dos grãos importa muito, e a agitação é tanto mais viva quanto mais pequenos são os grãos. Esta propriedade foi assinalada por Brown, desde o primeiro momento da sua descoberta. (p.135)

⁴ Imagem retirada do livro “Átomo” de Isaac Asimov (p.24)

⁵ Imagem retirada do livro “O Átomo – na Filosofia, na Química e na Física” de J. J. Andrade dos Santos (p.53)

4.2. «*En marche vers la terre promise*»

O trabalho desenvolvido por Brown acerca do *misterioso* fenómeno, apesar de extraordinário, não despertou muito interesse junto da comunidade científica (Perrin (1991, p.134). Os cientistas que entenderam falar sobre o mesmo atribuíram-lhe diversas causas, sendo que, como salienta Stachel (2005, p.87), as explicações do movimento browniano propostas após a exclusão das forças vitais, incluíam, entre outras, as correntes de convecção, a evaporação, a interacção com a luz e as forças eléctricas. Todas estas hipóteses acabaram por ser rejeitadas. Ainda assim, é de todo pertinente conhecer algo mais acerca das mesmas.

Brown, na continuação das suas observações, certificou-se que os movimentos não se deviam à presença de correntes na água ou à evaporação desta, concluindo que a origem dos mesmos tinha de ser diferente. Pois bem, os cientistas que admitiram como possíveis causas do movimento browniano, as correntes de convecção na água e a evaporação desta, desde muito cedo e graças ao trabalho de Brown, tiveram que abdicar das suas convicções. Nas palavras de Perrin (1991):

... e isto é talvez o carácter mais estranho e mais verdadeiramente novo – o movimento browniano não pára nunca. No interior de uma célula fechada (de modo a evitar a evaporação), pode-se observá-lo durante dias, meses, anos. Manifesta-se em inclusões líquidas fechadas no quartzo há milhares de anos. É eterno e espontâneo. (p.136)

Em 1858, o físico e químico francês, Henri Victor Regnault, atribuiu uma nova explicação ao movimento browniano. Regnault, como mencionam Carlos Solís e Manuel Sellés (2005, p.774), realizou importantes trabalhos experimentais sobre as propriedades térmicas dos materiais (sobretudo gases), e foi nesse âmbito que procurou encontrar uma resposta para o misterioso fenómeno. Regnault acreditava que este se devia ao aumento irregular da temperatura da água, como consequência da incidência da luz.



Figura 58: Henri Victor Regnault (1810-1878)⁶

Houve também quem atribuisse às forças eléctricas um lugar de destaque na explicação do movimento browniano. Em 1870, o filósofo e economista inglês William Stanley Jevons formulou a tese da origem eléctrica para o movimento browniano.



Figura 59: William Stanley Jevons (1810-1878)⁷

O caminho para a “*terra prometida*” começou definitivamente a traçar-se na década de 60 do século XIX. Pais (2004, 122) afirma que terá sido nessa altura que surgiu, por parte de diferentes cientistas, a hipótese de que o movimento das pequenas partículas em suspensão num líquido se devia a colisões entre estas e as moléculas de água. Em 1863, Ludwig Christian Wiener (1826-1926), matemático e físico alemão, deu o primeiro passo nesta direcção. Admitiu que o movimento browniano se devia a movimentos internos, próprios do estado líquido. De acordo com Perrin (1991), Wiener terá dito:

⁶ Imagem retirada do site: http://en.wikipedia.org/wiki/Henri_Victor_Regnault

⁷ Imagem retirada do site: http://en.wikipedia.org/wiki/William_Stanley_Jevons

A agitação não tem origem nas partículas, nem numa causa exterior ao líquido, mas deve ser atribuída a movimentos internos, característico do estado fluido. (p.136)

Segundo Perrin (1991, p.139), as pesquisas e conclusões obtidas por Wiener poderiam ter exercido uma acção considerável sobre a emergente teoria mecânica do calor. No entanto, como estavam constringidas a considerações confusas sobre acções mútuas de átomos materiais e “átomos de éter”, ficaram pouco conhecidas. Porém, cinco anos mais tarde, em 1867, o caminho certo voltaria a ser encontrado.

Giovani Cantoni, físico italiano, afirmou, de acordo com Pais (2004, 122), que o movimento das pequenas partículas em suspensão na água se devia aos choques entre estas e as moléculas de água que as rodeavam e golpeavam de diferentes direcções e com diferentes velocidades. Segundo a mesma fonte, Cantoni terá afirmado:

Penso que o movimento de dança das partículas sólidas (...) pode ser atribuído às diferentes velocidades que devem ser atribuídas (...) quer às ditas partículas sólidas, quer às moléculas do líquido que golpeiam (estas partículas sólidas) de todas as direcções. (p.123)

Acrescente-se ainda que este físico ao afirmar, de acordo com o artigo *Nascimentos da Física* (1998), que o movimento browniano decorria da agitação desordenada das moléculas de água, produzida pelo calor, levantou o véu de uma estreita *relação simbiótica* entre o movimento browniano e a teoria do calor. De facto, o movimento browniano foi um dos grandes portadores de notícias não só para a história do átomo, como também para a história do calor.



Figura 60: Giovanni Cantoni (1818-1897) ⁸

⁸ Imagem retirada do site: <http://www.liceoberchet.it/ricerche/netday98/milano/gallery/cantoni.htm>

Alguns anos mais tarde, em 1877, os jesuítas belgas Joseph Delsaulx (1828 – 1891) e Ignace Carbonelle (1829 – 1889) chegaram, independentemente, à mesma conclusão que Cantoni. Segundo Perrin (1991, p.139), Delsaulx e Carbonelle compreenderam, de uma forma mais clara, que o movimento molecular poderia ser a causa do movimento browniano. Afirmaram que este último seria resultado dos movimentos moleculares caloríficos do líquido ambiente. É isso mesmo que podemos comprovar na seguinte passagem atribuída a Delsaulx e retirada do livro de Pais (2004):

Sob o meu ponto de vista de considerar o fenómeno, os movimentos brownianos seriam o resultado dos movimentos moleculares caloríficos do líquido ambiente. (p.123)

Eles não se ficaram por aqui! Concluíram, também, que para partículas de grandes dimensões o fenómeno não era observado, pois os choques produziam-se em todas as direcções, compensando-se em média. Pelo contrário, tratando-se de partículas de dimensões bastante pequenas (grãos de pólen, por exemplo), o número de moléculas com que chocavam era suficientemente reduzido para que se dessem essas compensações, predominando os choques em direcções alternadas. Vejamos, mais detalhadamente e através de uma citação de Perrin (1991), o testemunho dado pelos belgas Delsaulx e Carbonelle:

... no caso de uma grande superfície, os choques moleculares, por causa da pressão, não produzirão nenhum abano do corpo suspenso, porque o seu conjunto solicita igualmente este corpo em todas as direcções. Mais, se a superfície é inferior à extensão capaz de assegurar a compensação das irregularidades, é preciso reconhecer pressões desiguais e continuamente variáveis de lugar para lugar, que a lei dos grandes números já não restabelece a uniformidade, e cuja resultante já não será nula, mas mudará continuamente de intensidade e de direcção... (p.139)

As considerações apresentadas por Cantoni e pelos dois jesuítas belgas tiveram alguma relevância na explicação do movimento browniano, porém, os seus argumentos constituíam matéria de especulação, e não uma prova.

Sensivelmente na mesma altura, o químico escocês Sir William Ramsey (Prémio Nobel da química em 1904 pela descoberta dos gases inertes e determinação do seu lugar na tabela periódica) reconheceu, também, a relação entre o movimento browniano e a agitação térmica. Contudo, baseava-se na suposição errónea de que cada zigzague no percurso de uma partícula suspensa se devia a uma simples colisão com uma

molécula individual. Pais (2004, p.123) afirma que mesmo não sendo muito quantitativas as experiências nesse tempo, não era difícil constatar que esta suposição conduzia a absurdos. Ramsey admitiu que a causa do movimento browniano deveria ser o contínuo e irregular bombardeamento das partículas em suspensão pelas moléculas do líquido ou do gás animadas de movimento térmico. De acordo com a sua suposição, as dimensões das partículas brownianas eram necessariamente muito pequenas para sofrerem a influência dos choques com moléculas isoladas, mas suficientemente grandes para que pudessem ser visíveis por meio de um microscópio.

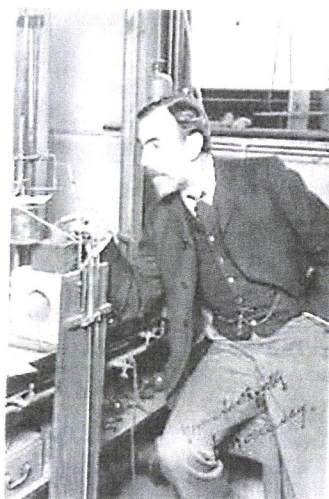


Figura 61: Sir William Ramsey (1852-1816) ⁹

Para muitos físicos da época não restavam dúvidas acerca da existência física das moléculas e que estas eram responsáveis pelo movimento browniano. A partir desta altura, os átomos e as moléculas ganharam outro estatuto. Começaram a ser promovidos de modelos teórico-hipotéticos a entidades físicas, pois a sua observação, apesar de indirecta, parecia ser possível.

Durante a década de setenta do século XIX, a teoria cinética do calor foi proposta como explicação para o movimento browniano por diversos autores. Baseando-se em resultados experimentais que faziam pressupor uma relação entre o «calor» e o movimento das pequenas partículas em suspensão, verificaram que a *dança* era mais animada quanto maior fosse a temperatura a que se encontravam as partículas em suspensão.

⁹ Imagem retirada do site: http://pt.wikipedia.org/wiki/William_Ramsay

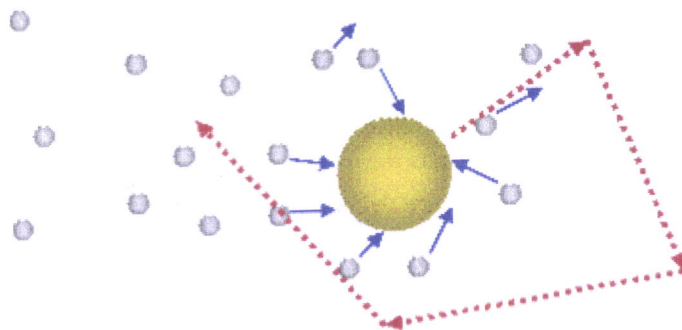


Figura 62: Representação esquemática do movimento browniano ¹⁰

A explicação dada para o movimento browniano parecia, nesta altura, ter trazido a confirmação que muitos esperavam há algum tempo, no entanto, e como em qualquer domínio do conhecimento científico, foi alvo de uma contra-argumentação. Stachel (2005, p.87) refere que, em 1879, o citologista suíço Karl von Nägeli desenvolveu um argumento muito convincente contra esta explicação.



Figura 63: Karl von Nägeli (1817-1891) ¹¹

Partindo do Teorema da Equipartição da Energia¹², Karl von Nägeli calculou a velocidade média das moléculas do líquido e, em seguida, utilizou as leis da colisão

¹⁰ Imagem retirada do site: <http://fma.if.usp.br/convite/coloquios/EinsteinBrown.html>

¹¹ Imagem retirada do site: <http://home.fiscalinet.ch/biografien/biografien/naegeli.htm>

¹² Segundo Paul Tipler (1995, p.236), é interessante observar que os sucessos do teorema da equipartição da energia na explicação das capacidades caloríficas observadas de gases e sólidos levaram, pela primeira vez, ao entendimento real da estrutura molecular, no século XIX, enquanto as falhas do teorema tiveram papel importante no desenvolvimento da mecânica quântica no século XX. De acordo com o mesmo autor, o teorema da equipartição de energia falha, pois a mecânica clássica também falha ao ser aplicada aos sistemas atômicos e moleculares, tendo que ser substituída pela mecânica quântica.

elástica para obter a velocidade de uma partícula em suspensão. Concluiu que a velocidade dessa partícula, dada a sua massa comparativamente grande, tenderia para zero. De acordo com o mesmo autor (2005, p.87), Louis-George Gouy (1854-1926) apresentou um pressuposto adequado para refutar argumentos como o de Nägeli e assim defender que a causa do movimento browniano é a agitação molecular. Para tal, admitiu a existência de movimentos colectivos de um grande número de átomos em líquidos.

Pais (2004, p.123) aborda também este assunto. Segundo o mesmo, a proposta apresentada por Nägeli, tal como a de Ramsay, baseava-se na suposição errónea de que cada ziguezague no percurso de uma partícula suspensa se devia a uma simples colisão com uma molécula individual. Já Gouy, que realizou algumas das melhores experiências do século XIX sobre o movimento browniano, conjecturou que as moléculas nos líquidos viajam em feixes organizados, de modo que um toque individual comunicado a uma partícula suspensa ficaria a dever-se à acção simultânea de um grande número de moléculas.

Durante o século XIX tinha-se tornado claro, com base nas experiências realizadas em vários laboratórios, que os movimentos brownianos dificilmente eram observáveis para partículas com um raio superior a 10^{-3} mm. Constatou-se que estes movimentos aumentavam quando diminuía o tamanho e a densidade das partículas suspensas, assim como, com a diminuição da viscosidade e com o aumento da temperatura do meio líquido (Pais, 2004, p.122).

Apesar dos avanços registado na explicação deste *misterioso* fenómeno, só em 1905 é que alguém, certamente muito especial, foi capaz de fazer do movimento browniano uma verdadeira teoria quantitativa e contribuir, de forma fulcral, para a aceitação do átomo e das moléculas enquanto entidades reais.

4.3. 1905: O *ANNUS MIRABILIS* de EINSTEIN

«Einstein foi, todavia, mais do que um físico brilhante, foi um grande pensador da Ciência, do Homem e da Sociedade; assim o atestam os conteúdos de muitos dos seus discursos, testemunhos e diálogos.»

Raquel Gonçalves¹³

Comemorou-se há bem pouco tempo, mais concretamente em 2005, o *Ano Internacional/Mundial da Física*, declarado pela UNESCO e pela ONU. Inúmeras instituições desenvolveram diversas acções visando a promoção da Física, destacando a sua vital importância na vida do Homem contemporâneo e do futuro. Mas,..., porquê 2005 e não outro ano qualquer? A resposta é simples, neste ano comemorou-se o centésimo aniversário da publicação de cinco artigos de Einstein que revolucionaram a Física e, conseqüentemente, alteraram a forma como passámos a encarar o Mundo à nossa escala, assim como o Mundo do infinitamente grande e infinitamente pequeno. Portanto, no início do século XX, em 1905, e pela mão de Einstein, tivemos o apanágio de assistir a duas grandes revoluções na nossa representação física do mundo, cujas teorias apontavam para aspectos que só muito mais tarde vieram a ser observados.

A primeira das revoluções deitou por terra as nossas concepções de espaço e de tempo, combinando-as naquilo a que agora se chama *espaço-tempo* (acabámos por utilizar o termo *relatividade* para a englobar). A segunda dessas revoluções modificou por completo a forma como entendemos a natureza da matéria e da radiação. Proporcionou-nos uma imagem da realidade onde as partículas se comportam como ondas e as ondas como partículas, em que as nossas descrições físicas normais ficam sujeitas a incertezas essenciais e em que os objectos individuais podem manifestar-se em diversos sítios ao mesmo tempo (a expressão *teoria quântica* inclui esta segunda revolução).

De acordo com Stachel (2005, p.19), a expressão latina *annus mirabilis* foi utilizada durante muito tempo para descrever o ano de 1666, durante o qual Isaac Newton estabeleceu os fundamentos de uma grande parte da física e da matemática que revolucionaram a ciência do século XVII.

¹³ Excerto retirado do livro de Raquel Gonçalves, *Ciência, Pós-Ciência, Metaciência* (1991, p.42)

Newton o sem paralelo, cujo Nome
o tempo não removerá do livro da Fama,
a Ciência Celeste promoveu mais
que todos os Sábios que brilharam anteriormente.
A Natureza compelida, à sua Mente penetrante obedece,
e alegremente lhe mostra todos os seus secretos caminhos;
contra a Matemática ela não tem defesa,
e submete-se à consequência experimental;
o seu Génio dominador, da Causa certa
cada Aparição à priori deduz
e revela do Arquitecto todo Poderoso as leis inalteradas.

(De J. T. Desagulier (1683-1744), *The Newtonian System of the World, the Best Model of Government, an Allegorical Poem*)¹⁴

São poemas como este, escrito após a sua morte, que destacam a forma como Newton, especialmente em Inglaterra, era praticamente divinizado. Foi uma das personalidades mais importantes na História da Ciência Moderna, marcando uma viragem na evolução das ciências e do Homem.

A expressão *annus mirabilis* estabelece um paralelismo interessante entre um ano crucial na vida do fundador da física clássica e um outro na do seu sucessor do século XX. A mesma foi associada ao ano de 1905, durante o qual Einstein publicou vários trabalhos que estabeleceram os fundamentos de uma teoria que viria a representar uma ruptura com a herança newtoniana, simbolizando um ponto de inflexão que revolucionou a ciência e a sociedade do século XX. Esta revolução é contemporânea de revoluções em várias áreas da cultura: pintura, literatura, etc.¹⁵

¹⁴ Citado por Holton et al., no livro *Projecto Física: Unidade 3, O triunfo da mecânica*

¹⁵ Ver Vargish, T. & Mook, D. (1999). *Inside Modernism – Relativity Theory, Cubism, Narrative*. New Haven and London: Yale University Press

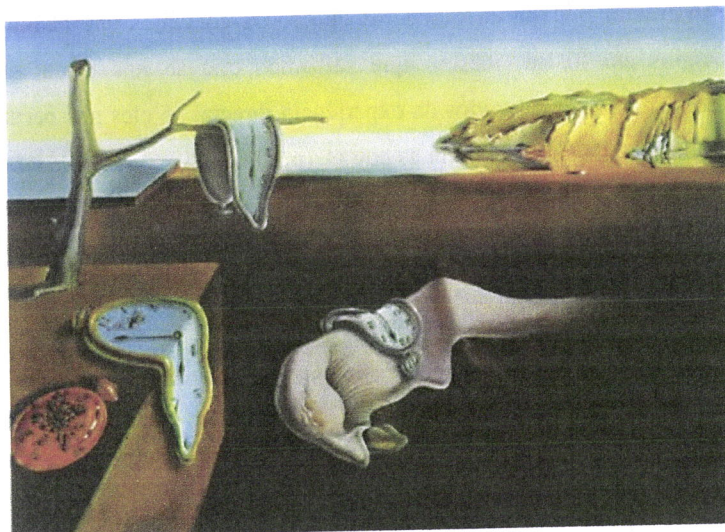


Figura 64: A Pintura de Salvador Dalí, *A Persistência da Memória*, pintado no século XX, em 1931, com aparente influência da relatividade restrita pela deformação do relógio.¹⁶

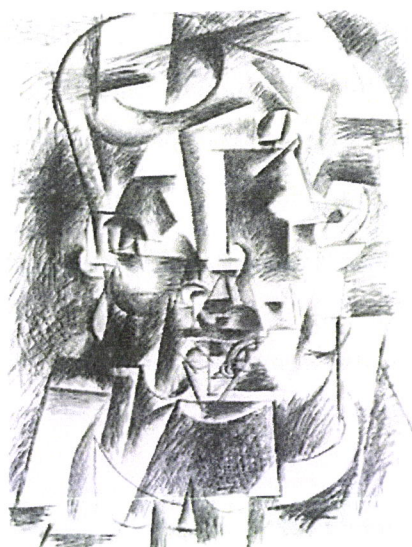


Figura 65: Pintura de Picasso na fase cubista, *Cabeza de hombre* (1910-11). Note-se a deformação do espaço.¹⁷

Em 1949, Einstein, nas suas *Notas Autobiográficas*, manifestava claramente a consciência que possuía de ter destruído o admirável edifício elaborado por Newton. O notável físico do século XX, citado por Balibar (1988), dizia o seguinte:

¹⁶ Imagem retirada do site: http://www.culturageneral.net/pintura/cuadros/la_persistencia_de_la_memoria.htm

¹⁷ Imagem retirada do site: <http://faculty-staff.ou.edu/L/A-Robert.R.Lauer-1/span4313cap13.html>

Newton desculpa-me! A via que abriste era a única que um homem dotado de uma inteligência brilhante e de um espírito criador poderia encontrar, na época. Os conceitos que elaboraste ainda hoje guiam os nossos raciocínios em Física, mesmo que saibamos que se nos torna agora necessário substituí-los por outros conceitos, mais afastados da experiência directa; só eles nos permitindo chegar a uma compreensão mais profunda das relações entre as coisas. (p.103)

Einstein teve a extraordinária capacidade de contribuir para estabelecer os alicerces das já referidas duas revoluções do século XX. Porém, não se ficou por aqui!

Acrescente-se que, nesse mesmo ano, este físico abriu novas perspectivas fundamentais em outras áreas, mais concretamente, com a sua tese de doutoramento sobre a determinação das dimensões moleculares e com a sua análise da natureza do movimento browniano. Esta última análise teria chegado para garantir a Einstein um lugar de destaque na História da Ciência. O seu magistral trabalho sobre o movimento browniano foi determinante para a aceitação dos átomos e das moléculas enquanto entidades reais. Efectivamente, os estudos desenvolvidos por Einstein em torno da misteriosa dança das partículas (em conjunto com o trabalho paralelo e independente de Smoluchowski), permitiu estabelecer os fundamentos de um instrumento importante de compreensão estatística, que tem tido enormes implicações em muitos outros domínios.

Em 1905, Einstein, então um jovem técnico, funcionário da Repartição de Patentes de Berna, na Suíça, produziu cinco dos seus mais importantes contributos para a ciência moderna, todos eles publicados nesse ano, pela primeira vez, na prestigiada revista alemã *Annalen der Physik*. Por ordem cronológica de recepção na revista, os trabalhos versavam os seguintes temas:

18 de Março – O *quantum* de luz;

11 de Maio – Movimento browniano;

30 de Junho – Relatividade restrita;

27 de Novembro – Segundo artigo sobre relatividade restrita (dedução da famosa equação $E = mc^2$);

19 de Dezembro – Segundo artigo sobre o movimento browniano.

Se acrescentarmos que o dia 19 de Agosto desse mesmo ano corresponde à data da recepção da sua tese de doutoramento sobre a determinação das dimensões

moleculares, devemos aceitar como inteiramente adequada a designação de *annus mirabilis* atribuída a 1905.

Os avanços fundamentais de Einstein em 1905 dependeram, de forma decisiva, da sua firme adesão à convicção de que as entidades físicas ao nível molecular e submolecular têm uma realidade *efectiva*. De facto, isso é manifesto nos cinco artigos referenciados. De entre todos eles, atribuímos especial relevância aos artigos sobre a tese de doutoramento de Einstein e sobre a teoria do movimento browniano, pois representam marcos fundamentais na ascensão do átomo ao domínio da realidade física. Para Einstein, a natureza atômica da matéria estava em primeiro plano, pelo que, nestes dois artigos, estava objectivamente interessado em demonstrar a natureza das moléculas que constituíam um fluido. Mostrou ser um mestre nas técnicas físicas/estatísticas, absolutamente necessárias para a concretização deste trabalho.

4.4. O novo poeta dos átomos

“A história do átomo é a história de uma das mais belas vitórias dos homens. Quer-nos até parecer que em todo o desenrolar das actividades humanas nunca a Ciência e a Poesia estiveram ligadas tão intimamente como neste caso.”

Rómulo de Carvalho¹⁸

Muitos de nós consideram que a Ciência constitui uma visão fria e utilitária do mundo, ou como alguns românticos referiam, uma visão desencantada do mundo. Pelo contrário! A Ciência abriu, e continua a abrir, o caminho para que o Homem se surpreenda cada vez mais com o mundo. O átomo tem, pois, lugar de destaque em todo este processo. Em 1905 surge, com todo o esplendor, o *novo poeta dos átomos* – Albert Einstein.

¹⁸ Excerto retirado do livro *História do átomo* (1975, p.7), de Rómulo de Carvalho

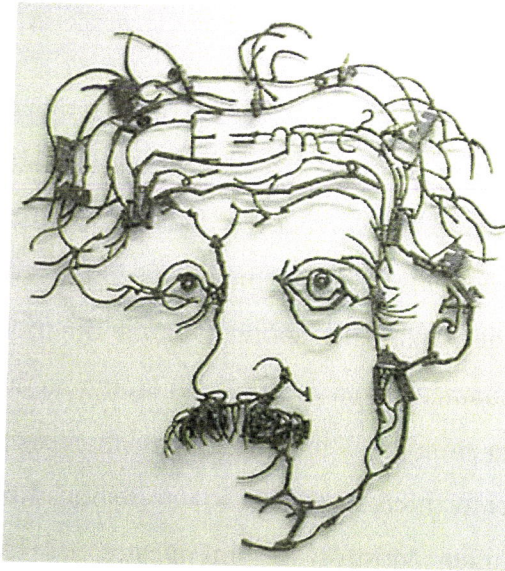


Figura 66: Escultura de Einstein, em exposição ao público no Instituto Max Planck para a História da Ciência, em Berlim.¹⁹

Ao apelidarmos Einstein de *novo poeta dos átomos*, tivemos como fonte de inspiração Lucrécio, o (*primeiro*) *poeta dos átomos*. De acordo com Carvalho (1975, pp. 18,19), o livro mais notável da antiguidade em que se fala dos átomos, do seu movimento, da sua forma, com pormenores valiosíssimos acerca do que se conhecia naquela altura sobre este assunto, é uma obra em verso, um belo poema de um poeta romano chamado Titus Lucretius Carus (96–55 a.C.), vulgarmente designado por Lucrécio. No seu longo poema, intitulado *De Natura Rerum* (expressão que significa *Sobre a Natureza das Coisas*), Lucrécio apresentou as ideias da época relativamente a vários temas científicos e, em particular, à existência de átomos. O *De Natura Rerum*, como menciona Baeyer (2000, p.9), foi uma obra ímpar, uma vez que funcionou simultaneamente como poesia, tratado científico e tratado moral, obtendo um sucesso espectacular nas três vertentes. A poesia de Lucrécio é bela e denota um espírito muito lúcido e sagaz, como testemunha Carvalho (1975). Vejamos um excerto da sua obra, citado por Carvalho (1975, p. 19), onde o poeta se dirige aos seus leitores na tentativa de os convencer que os átomos existem, são simples, sólidos e indestrutíveis, que nunca estão em repouso, movendo-se eterna e continuamente.

¹⁹ Imagem retirada do site: <http://einstein-virtuell.mpiwg-berlin.mpg.de/intro>

Repara na luz do Sol que faz penetrar um feixe de raios na obscuridade das nossas casas. Verás uma infinidade de corpúsculos entrecruzarem-se de mil maneiras através do vazio, no feixe luminoso, e, como soldados que participam numa guerra eterna, entregarem-se a combates e a batalhas, guerrearem em grupos, sem tréguas, febrilmente, ora juntando-se, ora separando-se. Por aqui podes imaginar o que seja a eterna agitação dos átomos no grande espaço vazio... Lucrécio (Livro II – versos 113 a 121)

Os dois poetas dos átomos, separados por cerca de vinte séculos, procuraram convencer os seus contemporâneos da realidade efectiva dos átomos. A obra de Lucrécio, apesar de extraordinária, acabou por não ter o sucesso que este almejava. De acordo com Baeyer (2000, p.10), nesse trabalho havia ainda uma intenção religiosa. O propósito específico do poeta romano era libertar a humanidade da opressiva dependência da superstição. Segundo Baeyer (2000, p.10), Lucrécio, numa das suas mais apaixonantes e líricas passagens, argumenta que a explicação dos fenómenos naturais em termos de átomos afasta a necessidade na crença de poderes divinos. Por exemplo, o vento era imaginado como sendo constituído por um fluxo de partículas materiais, em vez de ser interpretado como o trabalho de algum cruel e vingativo deus. Como tal, durante a sua vida e até ao século XVII foi rotulado de ateu e a sua doutrina foi condenada.

Ao invés, Einstein trouxe para as luzes da ribalta o átomo. Cientes do *gap* temporal que os separa (é certo que Einstein beneficiou de muitos séculos de reflexões e trabalhos em que se pôde basear), a razão principal pela qual um triunfou e o outro não, prende-se com o tipo de recursos que utilizaram e com as diferentes ambições explicativas do mundo. Enquanto que Lucrécio utilizou as letras e as palavras para defender o seu argumento, Einstein empregou na sua criação um instrumento inovador e que teve origem na segunda metade do século XIX – a *Física estatística*.

Maxwell e Boltzmann foram pioneiros na tentativa de demonstrar que as leis empiricamente estabelecidas da termodinâmica podiam ser explicadas teoricamente com base num modelo atomista da matéria. Einstein via-se como um continuador e aperfeiçoador das suas ideias.

4.5. Estudos em termodinâmica estatística

«Não inteirado das anteriores investigações de Boltzmann e Gibbs, que, efectivamente, haviam tratado exaustivamente o tema, desenvolvi a mecânica estatística e a teoria cinético-molecular da termodinâmica, nela baseada. Tive como objectivo principal encontrar factos que pudessem atestar a existência de átomos de dimensão finita.»

Einstein²⁰

Neste comentário de Einstein, que consta de um esboço autobiográfico publicado em 1949, o próprio refere-se ao seu contributo para a física estatística. De acordo com Pais (2004, p.77), aqui, o cientista geman-americano referia-se aos três artigos publicados entre 1902 e 1904, onde fez, segundo Max Born, citado por Purrington (1997, p.145), uma “redescoberta de todos os elementos essenciais da mecânica estatística”. Durante este período, labutando num relativo isolamento e possuindo apenas um conhecimento fragmentário dos escritos de Boltzmann, conseguiu, sem o saber, redescobrir resultados semelhantes aos do grande físico norte-americano, Josiah Willard Gibbs²¹. Purrington (1997, p.145) salienta que se Gibbs não tivesse publicado, em 1902, o seu trabalho sobre os “Princípios Elementares da Mecânica Estatística”, talvez Einstein fosse lembrado de uma maneira ainda mais enfática pelos contributos que deu à mecânica estatística. Em 1910, Einstein escreveu que, se tivesse tido conhecimento dos estudos de Gibbs, não teria publicado os artigos sobre os fundamentos da mecânica estatística, exceptuando alguns comentários (Pais, 2004, p.77).

²⁰ Citado por Pais (2004, p.77)

²¹ Segundo Purrington (1997, p.145), Gibbs terminou o seu doutoramento em 1863, na Universidade de Yale, nos Estados Unidos da América. Em Agosto de 1866 mudou-se para a Europa, onde trabalhou com matemáticos e físicos de nomeada. Foi professor de Maxwell, exercendo grande influência sobre este último na clarificação do conceito de entropia a nível microscópico, associado à energia indisponível. Gibbs consolidou a Física estatística e fez a sua síntese com a Termodinâmica. De acordo com Allègre (2005, p.200), este norte-americano foi, segundo parece, um dos raros contemporâneos a compreender os artigos de Boltzmann, cujo conteúdo era denso e de difícil acesso, o que revela grande desenvoltura na Matemática e também notável lucidez introspectiva.

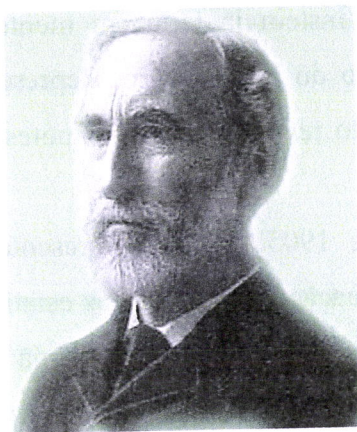


Figura 67: Josiah Willard Gibbs (1839-1903) ²²

Durante um quarto de século, Einstein escreveu cerca de quarenta artigos, relacionados, em diferentes graus, com a termodinâmica, a mecânica estatística e a teoria cinética. Para o desenrolar da nossa história, os artigos elaborados entre 1902 e 1904, dedicados aos fundamentos atomísticos da termodinâmica, adquirem especial relevo. De forma resumida, os estudos, desenvolvidos no período 1902-1904, sobre os fundamentos da mecânica estatística, constavam do seguinte: “O primeiro artigo trata das definições de temperatura e entropia em condições de equilíbrio térmico e do teorema da equipartição, o segundo da irreversibilidade, o terceiro das flutuações e dos novos processos de determinar a constante de Boltzmann” (Pais, 2004, p.80).

Estes artigos, assim o refere Pais (2004, p.78), pouco aditaram à fundamentação estatística da segunda lei da termodinâmica (que Einstein considerava uma consequência necessária da visão mecanicista do mundo) e, como Einstein destacou, não constituíram pré-requisitos para a compreensão do trabalho que apresentou em 1905 sobre a realidade dos átomos e das moléculas. Porém, o trabalho desenvolvido nestes artigos foi de tremenda importância para o sucesso posterior, nomeadamente, o artigo onde apresentou o germe da teoria das flutuações, que haveria de aplicar magistralmente de 1905 a 1925. Einstein virou-se para as flutuações pela primeira vez em 1904, ano em que, de acordo com Pais (2004, p.94), deduziu uma fórmula para a flutuação quadrática média da energia. Dos seus estudos retirou que quanto maiores forem as flutuações, menor será o grau de estabilidade térmica do sistema. Os cálculos que apresentou neste

²² Imagem retirada do site: <http://www.corrosion-doctors.org/Biographies/GibbsBio.htm>

artigo de 1904, sugerem que Einstein já teria em mente uma tentativa de aplicar raciocínios estatísticos à radiação do corpo negro. Representam, portanto, aquilo que viria a ser a base das suas «muito revolucionárias» hipóteses quânticas sobre a luz de 1905 (Stachel, 2005, p.32).

No dia 18 de Março de 1905, Einstein apresentou ao mundo o resultado, profundamente inovador, da aplicação das suas ideias estatísticas à mecânica quântica. Neste trabalho, publicado na conceituada revista alemã *Annalen der Physik*, este visionário físico demonstrou como chegou à hipótese do *quantum* de luz através de um argumento estatístico.

Dois meses depois, enviou para a mesma revista, um outro artigo intitulado “Sobre o movimento de pequenas partículas suspensas em líquidos em repouso exigido pela teoria cinético-molecular do calor” onde aplicou, embora em estilo diferente, as suas concepções sobre física estatística.

*5. Über die von der molekularkinetischen Theorie
der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden
Flüssigkeiten suspendierten Teilchen;
von A. Einstein.*

In dieser Arbeit soll gezeigt werden, daß nach der molekularkinetischen Theorie der Wärme in Flüssigkeiten suspendierte Körper von mikroskopisch sichtbarer Größe infolge der Molekularbewegung der Wärme Bewegungen von solcher Größe ausführen müssen, daß diese Bewegungen leicht mit dem Mikroskop nachgewiesen werden können. Es ist möglich, daß die hier zu behandelnden Bewegungen mit der sogenannten „Brownischen Molekularbewegung“ identisch sind; die mir erreichbaren Angaben über letztere sind jedoch so ungenau, daß ich mir hierüber kein Urteil bilden konnte.

Wenn sich die hier zu behandelnde Bewegung samt den für sie zu erwartenden Gesetzmäßigkeiten wirklich beobachten läßt, so ist die klassische Thermodynamik schon für mikroskopisch unterscheidbare Räume nicht mehr als genau gültig anzusehen und es ist dann eine exakte Bestimmung der wahren Atomgröße möglich. Erwies sich umgekehrt die Voraussage dieser Bewegung als unzutreffend, so wäre damit ein schwerwiegendes Argument gegen die molekularkinetische Auffassung der Wärme gegeben.

§ 1. Über den suspendierten Teilchen zuzuschreibenden
osmotischen Druck.

Im Teilvolumen V^z einer Flüssigkeit vom Gesamtvolumen V seien z -Gramm-Moleküle eines Nichtelektrolyten gelöst. Ist das Volumen V^z durch eine für das Lösungsmittel, nicht aber für die gelöste Substanz durchlässige Wand vom reinen Lösungs-

Figura 68: Excerto do artigo de Einstein sobre o movimento browniano ²³

²³ Imagem retirada do site:

http://echo.mpiwgberlin.mpg.de/zogilib?fn=/permanent/einstein/annalen/Einst_Ueber_de_1905/pageimg&pn=1

Este artigo, onde Einstein desenvolveu a teoria do movimento browniano, representa um marco na história do átomo e da teoria atômica. Os fundamentos teóricos nele explanados permitem-nos afirmar que Einstein, do ponto de vista teórico, foi o primeiro a tornar visíveis os átomos e as moléculas. A dedução das leis do movimento browniano protagonizada por este físico (não só neste artigo, como em artigos posteriores) e a subsequente verificação experimental feita por Perrin, contribuíram significativamente para o reconhecimento da realidade física dos átomos pelos mais cépticos, na altura ainda numerosos.

4.6. A explicação do movimento browniano: suprema inspiração do novo poeta dos átomos

“Prometo-te quatro artigos [...], o primeiro dos quais poderei enviar-te em breve, uma vez que devo estar quase a receber as minhas cópias gratuitas. Trata da radiação e das propriedades energéticas da luz e é muito revolucionário, como verás. [...] O segundo artigo é uma determinação das verdadeiras dimensões dos átomos, a partir da difusão e viscosidade de soluções diluídas de substâncias neutras. O terceiro prova que, partindo da hipótese da teoria molecular [cinética] do calor, os corpos com uma ordem de grandeza de 1/1000 mm. suspensos em líquidos, efectuam já um movimento aleatório observável, que é produzido por movimento térmico; de facto, os fisiologistas observaram movimentos em pequenos corpos suspensos, inanimados, a que chamaram «movimento molecular browniano». O quarto artigo ainda está em fase de esboço e consiste numa electrodinâmica dos corpos em movimento, que recorre a uma modificação da teoria do espaço e do tempo; a parte puramente cinemática deste artigo vai seguramente interessar-te.”

Excerto dos resumos que Einstein enviou, entre 18 e 25 de Maio de 1905, a Conrad Habich, um amigo chegado, acerca dos artigos que publicou em 1905.²⁴

(O sublinhado é da nossa responsabilidade)

Os segundo e terceiro artigos a que Einstein se referia eram, respectivamente, sobre a sua tese de doutoramento e sobre a teoria do movimento browniano. O destaque que atribuímos à tese de doutoramento de Einstein (testemunhado, em primeiro lugar, pelo sublinhado), prende-se com o seguinte: as ideias que desenvolveu neste trabalho

²⁴ Retirado do livro de Stachel, *O ANNUS MIRABILIS DE EINSTEIN*, cinco artigos que revolucionaram a física (2005, p.20, 21)

foram essenciais para a elaboração do artigo sobre o movimento browniano. “De facto, em alguns aspectos – não em todos –, os resultados sobre o movimento browniano são subprodutos do trabalho de tese, o que explica que a publicação sobre o movimento browniano tenha sido recebida pela revista *Annalen der Physik* em 11 de Maio de 1905, somente onze dias depois de ter completado a tese.” (Pais, 2004, p.117)

4.6.1. A tese de doutoramento de Einstein

“A teoria cinética dos gases tornou possíveis as primeiras determinações das verdadeiras dimensões das moléculas, mas até agora os fenómenos físicos observados em líquidos não ajudaram a estabelecer com precisão as dimensões moleculares. Esta situação deve-se seguramente ao facto de ainda não ter sido possível ultrapassar os obstáculos que impedem o desenvolvimento de uma teoria cinético-molecular dos líquidos circunstanciada. Iremos demonstrar neste artigo que a dimensão das moléculas de substâncias dissolvidas numa solução diluída não dissociada pode ser determinada a partir da viscosidade interna da solução e do solvente puro e a partir da taxa de difusão do soluto no solvente, desde que o volume de uma molécula de soluto seja grande quando comparado com o volume de uma molécula de solvente. Isso é possível porque uma tal molécula comportar-se-á em termos da sua mobilidade no solvente e do efeito na viscosidade deste, aproximadamente como um corpo sólido em suspensão num solvente. Assim, na vizinhança imediata de uma molécula, é possível aplicar as equações de hidrodinâmica ao movimento do solvente, em que o líquido é considerado homogéneo e por isso a sua estrutura molecular não precisa de ser tida em consideração. Escolhemos a esfera como o corpo sólido que representa as moléculas do soluto.”

Excerto da tese de doutoramento de Einstein, intitulada “Uma nova determinação das dimensões moleculares”²⁵

A maioria das narrativas e bibliografias referentes à obra de Einstein destacam, invariavelmente, 1905 como o *annus mirabilis* devido aos artigos que este escreveu sobre o *quantum* de luz, a relatividade e o movimento browniano. Contudo, nesse mesmo ano, o visionário físico concluiu um dos seus trabalhos mais importantes – a tese de doutoramento sobre a determinação das dimensões moleculares. Apesar da influência que esta teve para o posterior desenvolvimento da teoria do movimento browniano, não tem sido suficientemente reconhecida como uma das suas publicações mais relevantes (Pais, 2004, p.117).

Einstein concluiu a tese no dia 30 de Abril de 1905 e, a 20 de Julho,

²⁵ Retirado do livro de Stachel, *O ANNUS MIRABILIS DE EINSTEIN*, cinco artigos que revolucionaram a física (2005, p.59, 60)

apresentou-a na Universidade de Zurique. Este atraso, como destaca Pais (2004, p.117), pode ter-se devido aos trabalhos que desenvolveu entre Abril e Julho sobre o movimento browniano e a teoria da relatividade restrita.

Os primeiros métodos fiáveis de determinação das dimensões moleculares foram desenvolvidos na segunda metade do século XIX, com base na teoria cinética dos gases, pelo que, em 1905, já se encontravam disponíveis diversos métodos que possibilitavam a determinação experimental das dimensões moleculares. De acordo com Stachel (2005, p.47), a maior parte dos métodos disponíveis até esta data davam valores mais ou menos compatíveis para a dimensão das moléculas e para o número de Avogadro.

Na tese de doutoramento, Einstein desenvolveu um novo método teórico que lhe permitia determinar os raios moleculares e o número de Avogadro. Em vez de recorrer ao comportamento dos gases, como era prática até então, utilizou fenómenos em fluidos para determinar as dimensões moleculares. No entanto, como destaca Stachel (2005, p.48), não havia uma teoria cinética dos líquidos comparável com a teoria cinética dos gases. Ainda assim, o método desenvolvido por Einstein na sua tese oferece valores comparáveis, em termos de precisão, aos valores obtidos pela teoria cinética dos gases.

De acordo com Stachel (2005, p.32), a hipótese central da teoria apresentada por este físico consistia na validade da utilização da hidrodinâmica clássica para calcular o efeito das moléculas em solução, consideradas esferas rígidas, sobre a viscosidade do solvente numa solução diluída. O seu método ajustava-se bem à determinação da dimensão das moléculas em solução, que são grandes quando comparadas com as moléculas do solvente. Para o estabelecimento deste novo método, Einstein recorreu, segundo Stachel (2005, p.32), à teoria molecular da difusão, que Nernst (1864-1941) desenvolvera com base na analogia de van't Hoff²⁶ entre soluções e gases e na lei de

²⁶ De acordo com Pais (2004, p.114), em meados de 1880, enquanto professor de Química, Mineralogia e Geologia da Universidade de Amsterdão, van't Hoff descobriu, no decurso de estudos sobre equilíbrio químico em soluções, que soluções bastante diluídas são comparáveis a gases ideais. Segundo van't Hoff, a fase líquida proporcionava um novo processo para determinar a constante dos gases e, consequentemente, novas possibilidades de determinação do número de Avogadro. Tendo por base os estudos de van't Hoff, (traduzidos pelas leis de van't Hoff) em 1915, Ehrenfest, citado por (Pais, 2004, p.116), escreveu o seguinte: «O facto de numa solução diluída as moléculas dissolvidas exercerem sobre uma membrana semipermeável – apesar da presença do solvente – exactamente a mesma pressão como se estivessem isoladas, e constituindo um gás ideal, é tão inesperado que foram feitas repetidas tentativas para encontrar uma interpretação cinética que fosse tão lúcida quanto possível.»

van't Hoff foi o primeiro a receber o Prémio Nobel da Química, em 1901. Pais (2004, p.116) refere que no discurso de apresentação dessa ocasião, e em relação a este cientista, foi dito o seguinte: «Demonstrou que a pressão de gás e a pressão osmótica são conceitos idênticos e, consequentemente, que as próprias moléculas na fase gasosa e em soluções também são idênticas. Como resultado disso, ficou definido o conceito de molécula em química e com uma validade universal até aí nunca antes sonhada.»

Stokes do atrito hidrodinâmico.

Contrariamente ao trabalho que realizaria sobre o movimento browniano, para o qual ainda não estavam disponíveis as técnicas experimentais necessárias para obter informações a partir das observações, o método hidrodinâmico utilizado por Einstein para determinar as dimensões das moléculas em solução permitia-lhe deduzir novos resultados empíricos a partir de dados de tabelas padrão (Stachel, 2005, p.32).

À semelhança do que fez Loschmidt²⁷, cujo método se baseava na teoria cinética dos gases, Einstein usou duas equações simultâneas, nas quais relacionava duas incógnitas, o número de Avogadro N e o raio molecular a . Da comparação das equações finais com os dados sobre soluções de açúcar em água determinou que:

$$a = 9,9 \times 10^{-8} \text{ cm,}$$
$$N = 2,1 \times 10^{23}$$

No final da sua tese (à qual tivemos acesso a partir do livro de Stachel, intitulado «O *ANNUS MIRABILIS* DE EINSTEIN, cinco artigos que revolucionaram a física»), Einstein escreveu o seguinte:

O valor de N a que chegámos está satisfatoriamente de acordo, em ordem de grandeza, com valores obtidos para esta quantidade através de outros métodos.

Pouco tempo depois da tese ter sido aceite, no dia 19 de Agosto de 1905, a revista *Annalen der Physik* recebeu uma cópia para publicação. A tese só foi publicada depois de Einstein ter apresentado uma breve adenda, em Janeiro de 1906. Pais (2004, p.117) refere que, no apêndice do artigo publicado em 1906, Einstein apresentou um novo e melhorado valor para N , cuja diferença em relação ao anterior se devia inteiramente à disponibilidade de melhores dados sobre soluções de açúcar. O resultado obtido foi:

$$N = 4,15 \times 10^{23}$$

²⁷ Pais (2004, p.120) menciona que o único método para a determinação de N e a do século XIX que Einstein discutiu no breve artigo de revisão sobre a teoria cinética foi o de Loschmidt.

A tese de Einstein só apareceu publicada na prestigiada revista *Annalen der Physik* depois de o artigo sobre o movimento browniano ter sido publicado na mesma. Como destaca Pais (2004, p.117), tal pode ter contribuído para criar a impressão, nalguns quadrantes, de que a relação entre a difusão e viscosidade fora obtida pela primeira vez no artigo sobre o movimento browniano. Efectivamente, surgiu primeiro na sua tese e foi uma das duas equações fundamentais para a concretização da mesma. De acordo com Stachel (2005, p.53), esta equação foi deduzida a partir de uma expressão para o coeficiente de difusão D do soluto. Baseando-se na lei de Stokes para uma esfera de raio a movendo-se num líquido e na lei de van't Hoff para a pressão osmótica, obteve a seguinte equação:

$$D = \frac{RT}{N} \cdot \frac{1}{6\pi\eta a} \quad (1)$$

onde R é a constante dos gases, T a temperatura absoluta, η o coeficiente de viscosidade de um líquido sem moléculas de soluto dissolvidas, e N o número de Avogadro.

Por coincidência, a equação 1 foi descoberta na Austrália sensivelmente ao mesmo tempo que Einstein fazia a tese. Segundo Pais (2004, p.121), em Março de 1905, William Sutherland (1859-1911) chegou à mesma equação que Einstein. Portanto, este autor defende (2004, p.121) que a relação traduzida pela equação 1 deveria designar-se por *relação de Sutherland-Einstein*.

Einstein viria mais tarde, em 1911, a recorrer ao método desenvolvido na tese, obtendo um novo valor de N :

$$N = 6,6 \times 10^{23}$$

Para a obtenção deste novo valor, Einstein beneficiou de um esclarecimento, dado cinco anos após a publicação da sua tese, por Bacelin, um aluno de Jean Perrin (Pais, 2004, p.121). Este informou-o de um erro que constava na mesma,

nomeadamente nas medidas do coeficiente de viscosidade de um líquido com moléculas de soluto dissolvidas²⁸. Por esta altura, como veremos, já Perrin tinha uma ideia precisa do valor que N devia ter.

A tese de doutoramento de Einstein representou o seu primeiro grande êxito na tentativa de alcançar uma melhor fundamentação para a hipótese atómica. Esta tentativa culminaria com a sua explicação do, até então, *misterioso* movimento browniano.

4.6.2. O primeiro artigo de Einstein sobre o movimento browniano

“Neste artigo demonstrar-se-á que, segundo a teoria cinético-molecular do calor, os corpos de dimensão microscopicamente visível suspensos em líquidos têm de executar, em resultado de movimentos térmicos moleculares, movimentos de magnitude tal que podem ser facilmente observados ao microscópio. É possível que os movimentos aqui analisados sejam idênticos ao chamado movimento molecular browniano. No entanto, os dados de que disponho sobre este último são tão imprecisos que não me foi possível formular um juízo sobre essa questão.

Se o movimento que irá ser aqui analisado puder de facto ser observado, assim como as leis a que se espera que obedeça, então a termodinâmica clássica deixará de poder ser vista como válida para regiões na escala de resolução do microscópio e tornar-se-á possível uma determinação exacta das dimensões

²⁸ O coeficiente de viscosidade de um líquido com moléculas de soluto dissolvidas foi empregado por Einstein na outra equação que utilizou. Esta permitia, à semelhança da equação 1, relacionar as duas incógnitas N e a . Traduzia-se pelo seguinte:

$$\eta^* = \eta (1 + \varphi) \quad (2)$$

onde η^* representa o coeficiente de viscosidade de um líquido com moléculas de soluto dissolvidas (viscosidade efectiva), η o coeficiente de viscosidade de um líquido sem moléculas de soluto dissolvidas e φ a fracção do volume ocupado pelas moléculas em solução. φ consistia no seguinte:

$$\varphi = \frac{N\rho}{m} \frac{4\pi}{3} a^3 \quad (3)$$

em que, segundo Pais (2004, p.119), N representa o número de Avogadro, a o raio molecular, m o peso molecular do soluto e ρ a quantidade de massa de soluto por unidade de volume.

De acordo com Pais (2004, p.119), Einstein ao ser informado por Bacelin do erro que constava na sua tese de doutoramento, pôs a trabalhar um dos seus alunos, o qual descobriu que havia um erro elementar, mas não trivial, na dedução da equação 2. O resultado correcto é:

$$\frac{\eta^*}{\eta} = 1 + \frac{5\varphi}{2} \quad (4)$$

atómicas reais. Por outro lado, se se viesse a provar que a previsão deste movimento estava errada, esse facto constituiria um argumento de peso contra a concepção cinético-molecular do calor.”

Excerto do artigo de Einstein, intitulado “Sobre o movimento de pequenas partículas suspensas em líquidos em repouso exigido pela teoria cinético-molecular do calor”²⁹

No dia 11 de Maio de 1905, onze dias depois do físico de origem germânica ter concluído a sua tese de doutoramento, a revista *Annalen der Physik* recebeu um novo artigo de Einstein. Este artigo, que tinha por título “Sobre o movimento de pequenas partículas suspensas em líquidos em repouso exigido pela teoria cinético-molecular do calor”, seria absolutamente relevante para o desenvolvimento da física do século XX. Neste, e por intermédio de um génio, a humanidade teve o privilégio de assistir à ascensão dos átomos e das moléculas ao mundo da realidade. A explicação teórica do movimento browniano, realizada por Einstein neste artigo, contribuiu decisivamente para o *terminus* do fervoroso debate científico-filosófico em torno da realidade atómica. Acrescente-se ainda, que o estudo que efectuou acerca do movimento browniano beneficiou, e muito, da posterior confirmação experimental efectuada por Perrin. Os trabalhos experimentais levados a cabo por este último, foram determinantes para que o átomo abandonasse o estatuto de hipótese e passasse a pertencer ao domínio do real.

Em 1905, Einstein pouco conhecia acerca da história pormenorizada do movimento browniano. A ausência do termo *movimento browniano* do título do artigo é explicada pelas frases: «É possível que os movimentos aqui analisados sejam idênticos ao chamado movimento molecular browniano. No entanto, os dados de que disponho sobre este último são tão imprecisos que não me foi possível formular um juízo sobre essa questão.» O trabalho desenvolvido na tese de doutoramento, finda pouco tempo antes, foi preponderante para o desenvolvimento deste artigo. «Ao referir-se a fluidos em repouso, tinha claramente em mente os fluidos em movimento com que havia lidado no trabalho anterior» (Pais, 2004, p.124).

²⁹ Retirado do livro de Stachel, *O ANNUS MIRABILIS DE EINSTEIN*, cinco artigos que revolucionaram a física (2005, p.99)

De acordo com Pais (2004, p.124), o primeiro artigo de Einstein sobre o movimento browniano foi, de um certo sentido, uma anotação à tese de doutoramento. Este artigo começa, segundo Stachel (2005, p.91, 92), com a dedução da equação, que já tinha sido obtida na tese, para o coeficiente de difusão (equação 1). Aqui, contrariamente à anterior dedução, Einstein utiliza a física estatística em que tinha mergulhado até 1904. Para além disso, enquanto que na tese tratava de soluções, no artigo sobre o movimento browniano, o seu estudo assentava em suspensões, pelo que a equação que desenvolveu para o coeficiente de difusão tinha em consideração o raio das partículas brownianas em suspensão, em vez do raio das moléculas de soluto.

Paralelamente, Einstein admitiu que o movimento browniano (para simplificar, Einstein tratou o movimento como um problema unidimensional) era descrito por um processo de difusão baseado na introdução de uma distribuição de probabilidades para os deslocamentos (Stachel, 2005, p.92). Esta equação permitia, portanto, descrever o deslocamento das partículas brownianas em suspensão através de uma distribuição de probabilidade que determinava o número de partículas deslocadas numa certa distância em cada intervalo de tempo. Este mecanismo de difusão era descrito, segundo Pais (2004, p.126), pela equação:

$$D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (5)$$

em que $n(x, t)$ representa o número de partículas em torno de x no instante t .

De acordo com Pais (2004, p.127), Einstein, ao combinar a solução da equação de difusão com a equação para o coeficiente de difusão, obteve a equação fundamental para o movimento browniano:

$$\langle x^2 \rangle = \frac{RT}{3\pi N a \eta} t \quad (6)$$

onde $\langle x^2 \rangle$ representa o deslocamento quadrático médio, R a constante dos gases, T a temperatura absoluta, η a viscosidade do meio onde a partícula browniana se

movimenta, a o raio da partícula browniana, t o intervalo de tempo em que são observados os deslocamentos e N o número de Avogadro.

Toda a física importante do primeiro artigo de Einstein sobre o movimento browniano estava contida na equação 6. Esta criação foi, de facto, um acto de suprema inspiração. Nesta, $\langle x^2 \rangle$, t , a e η podiam ser mensuráveis, o que permitia a determinação de N . “...nunca deixamos de experimentar surpresa por este resultado, que parece, como tal, surgir do nada: se prepararmos um conjunto de pequenas esferas, que são, apesar disso, enormes, quando comparadas com moléculas simples, e utilizarmos um cronómetro e um microscópio, obteremos o número de Avogadro.” (Pais, 2004, p.127).

Em menos de dois meses, o artigo de Einstein sobre o movimento browniano marcou a terceira ocasião em que este fez uma descoberta fundamental acerca da determinação do número de Avogadro. Os três métodos utilizados foram consideravelmente distintos. Segundo Pais (2004, p.124), no primeiro deles, recebido pela revista *Annalen der Physik* no dia 18 de Março de 1905, obteve $N = 6,17 \times 10^{23}$. Para esta determinação, utilizou o limite dos grandes comprimentos de onda da lei da radiação do corpo negro. No segundo, desenvolvido na sua tese de doutoramento e já discutido anteriormente, forneceu-lhe $N = 2,1 \times 10^{23}$. No terceiro, como vimos, obteve uma fórmula, mas não um número.

Em 1905, quando elaborou a teoria do movimento browniano, o físico de ascendência germânica tinha pouco conhecimento da literatura sobre o assunto. Contudo, tinha razão ao supor que os dados apropriados ainda não se encontravam à disposição. No final do artigo sobre o movimento browniano, Einstein, citado por Pais (2004, p.124), escreveu o seguinte:

Oxalá que algum investigador consiga decidir rapidamente a questão aqui levantada, que é importante para a teoria do calor.

Et voilà, alguns anos mais tarde, em 1908, um investigador francês, de seu nome Jean Perrin, conseguiu decidir rápida e experimentalmente a questão levantada por Einstein no seu primeiro artigo sobre o movimento browniano.

Pais (2004, p.125) salienta que Einstein se deve ter apercebido que a ubiquidade de N resolveria de uma vez por todas a velha discussão em torno da realidade atómica e molecular. Como tal, a invenção de novos métodos para obter o número do Avogadro

foi um dos objectivos primordiais de alguns dos seus trabalhos posteriores. Em Dezembro de 1905, concluiu o segundo artigo sobre o movimento browniano³⁰, onde desenvolveu dois novos métodos para determinar N . Dois anos mais tarde, demonstrou que as medições de flutuações de tensão eléctrica proporcionam outro meio para a determinação de N . Em 1910 apresentou mais um novo método baseado na opalescência crítica.

Os artigos de Einstein sobre o movimento browniano, para além de terem representado um passo decisivo rumo à realidade atómica, contribuíram para ajudar a estabelecer o estudo dos fenómenos de flutuação como um novo ramo da física.

4.6.3. Smoluchowski: uma justa homenagem

“...investigador engenhoso e um ser humano nobre e subtil”

Designação atribuída por Einstein a Smoluchowski após a morte deste último³¹



Figura 69: Marian Ritter von Smolan-Smoluchowski (1872-1917)³²

³⁰ «Dezembro de 1905: tendo sido informado por alguns colegas de que as considerações do artigo anterior se ajustavam, no que se refere à ordem de grandeza, aos dados experimentais sobre o movimento browniano, Einstein intitula o novo artigo «Sobre a teoria do movimento browniano», fornecendo duas novas aplicações das ideias anteriores – a distribuição vertical de uma suspensão sob a influência da gravitação e o movimento browniano rotacional para o caso de uma esfera sólida em rotação. Paralelamente, obtém duas novas equações a partir das quais se pode determinar N .» (Pais, 2004, p.129)

³¹ Citado por Pais (2004, p.135)

³² Imagem retirada do site: <http://www.york.ac.uk/depts/math/histstat/people/smoluchowski.gif>

O *misterioso* movimento das partículas em suspensão foi explicitamente analisado por Einstein e Smoluchowski, que publicaram, de forma independente, os seus estudos teóricos entre 1905 e 1907. Einstein terminou o seu primeiro artigo sobre o movimento browniano em Maio de 1905, enquanto que Smoluchowski completou o dele em Julho de 1906. É extraordinário o número de ocasiões que Smoluchowski e Einstein prosseguiram simultânea e independentemente problemas similares, se não mesmo idênticos. Em 1904, Einstein investigou as flutuações de energia, e Smoluchowski estudou as flutuações do número de partículas de um gás ideal (Pais, 2004, p.132). Este aspecto é um dos exemplos que dá conta da maturidade da época para estas criações.

Seria de todo injusto não realçar, ainda que de forma sucinta, o contributo dado por Smoluchowski (de ascendência polaca) para o desenvolvimento da teoria do movimento browniano. Segundo Perrin (1991, p.166), Smoluchowski fez uma análise aproximada e bastante sugestiva desta matéria (que não iremos desenvolver). Se este tivesse sido somente um físico teórico eminente, e não, ao mesmo tempo, um bom experimentalista, teria sido, provavelmente, o primeiro a publicar uma teoria quantitativa do movimento browniano. (Pais, 2004, p.131).

Contrariamente a Einstein, Smoluchowski tinha um profundo conhecimento dos estudos efectuados no século XIX sobre o movimento browniano. O artigo que publicou em 1906 é testemunho disso mesmo. Nele, podemos encontrar uma crítica de todas as explicações do fenómeno anteriores à de Einstein. Smoluchowski, à semelhança de Einstein, também refutou a objecção apresentada por Ramsey e Nægeli (consultar pp. 178-180), realçando que aquilo que observamos no movimento browniano é, na realidade, o movimento médio resultante de 10^{20} colisões por segundo com as moléculas do líquido ambiente. Para além disso, admitiu que Nægeli estava equivocado ao admitir que os efeitos das colisões deveriam, em média, cancelar-se mutuamente.

De acordo com Pais (2004), Smoluchowski iniciou o artigo de 1906 referindo-se aos dois artigos de Einstein sobre o movimento browniano da seguinte maneira:

Os resultados apresentados [nesses artigos] concordam em absoluto com alguns resultados que [...] obtive há alguns anos e que desde então considero como um importante argumento para a natureza cinética deste fenómeno. (p.132)



E porque não os terá publicado anteriormente? A resposta é dada pelo próprio Smoluchowski no seu artigo. Como já foi referido, este era experimentalista e, segundo as suas palavras, citado por Pais (2004):

Ainda que não me tenha sido possível até agora fazer um teste experimental das consequências deste ponto de vista, coisa que inicialmente pretendia fazer, decidi publicar estas considerações [...] (p.132)

Tal como destaca Pais (2004, p.132), o artigo de Smoluchowski representou um contributo importantíssimo para a física, mesmo estando fora de questão a prioridade de Einstein (como o próprio Smoluchowski salientou numa carta a Jean Perrin).

A história do movimento browniano ficou marcada pela correspondência mantida entre Einstein e Smoluchowski, particularmente no desenvolvimento de um novo método para a determinação de N . Nas palavras de Pais (2004):

Sobreviveram seis cartas entre Einstein e Smoluchowski. Todas elas mostram cordialidade e grande respeito mútuo. A correspondência começa com uma nota de 1908 de Einstein informando Smoluchowski de que lhe tinha enviado algumas cópias dos seus artigos e solicitando cópias dos trabalhos deste. A comunicação seguinte, em Novembro de 1911, é de novo de Einstein e trata de um novo assunto que tinha atraído os dois homens: a opalescência crítica. (p.133)

4.7. A prova final: confirmação experimental obtida por Perrin de alguns resultados previstos

“Pensava que era impossível analisar o movimento browniano de forma tão rigorosa; foi extremamente positivo para a investigação nesta área que tenha decidido abordar esta matéria.”

Excerto da carta de que Einstein enviou a Perrin no dia 11 de Novembro de 1909 ³³

³³ Citado por Pais (2004, p.130) e por Stachel (2005, p.95)

Na altura em que Einstein publicou os seus primeiros artigos sobre o movimento browniano já se encontravam disponíveis diversas técnicas, então recentemente aperfeiçoadas, de investigação experimental sobre este assunto. De entre estas técnicas, destacavam-se o recém-inventado ultramicroscópio e os novos métodos de preparação de soluções coloidais. O ultramicroscópio não só veio demonstrar a realidade física das partículas coloidais, como também mostrou que o movimento irregular é uma das suas mais marcantes características. De acordo com Stachel (2005, p.93), Aimé Cotton e Henri Mouton publicaram, em 1906, um livro intitulado «*Les ultramicroscopes et les objects ultramicroscopiques*». Esta obra, que incidia sobre a ultramicroscopia e as suas aplicações contribuiu, segundo o mesmo autor, para estimular o interesse pelo estudo do misterioso e belo movimento, chamando, simultaneamente, a atenção dos investigadores desta área para a teoria de Einstein.

4.7.1. Evidência experimental para a teoria de Einstein

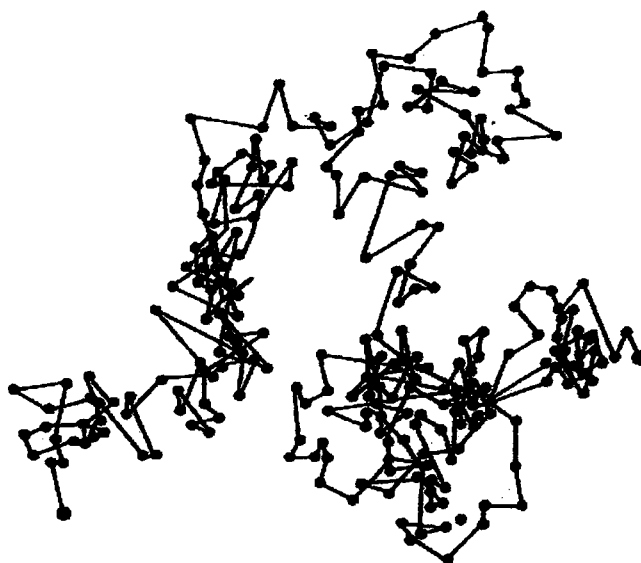


Figura 70: Representação esquemática do movimento browniano ³⁴

³⁴ Imagem retirado do livro de Jean Perrin, *Les Atomes* (1991, p.174)

Um dos investigadores que teve acesso aos trabalhos de Einstein sobre o movimento browniano foi o eminente físico francês Jean Perrin. Como o próprio refere em *Les Atomes* (1991, p.172), ao tomar conhecimento desses trabalhos através de Langevin (1872-1946), decidiu efectuar experiências que demonstrassem, com exactidão, os estudos teóricos apresentados por Einstein.

Em 1908, Perrin publicou os primeiros resultados de uma série de experiências, alcançando uma até então inigualável precisão na confirmação de quase todas as previsões de Einstein. Tal como este último, Perrin reconhecia que a analogia estabelecida por van't Hoff entre um gás ideal e uma solução podia ser alargada a emulsões, considerando, portanto, que estas representavam um meio único para a determinação do número de Avogadro e para a consequente comprovação do atomismo. Como o próprio salienta (1991):

...as leis dos gases perfeitos aplicam-se em todos os seus detalhes às emulsões, é isso que confere uma base experimental sólida às teorias moleculares. (p.193)

O êxito de Perrin assentou na combinação engenhosa de diversas técnicas experimentais para preparar, com precisão, emulsões utilizando partículas de dimensões controláveis e para medir o número e os deslocamentos dessas partículas.

Jean Perrin, cientista dotado de excepcional competência e habilidade, ao efectuar as suas experiências sobre o movimento browniano recorreu a uma analogia determinante para o sucesso das mesmas: admitiu que as partículas em suspensão poderiam ser consideradas como moléculas de dimensões extraordinariamente grandes. Desta forma, poderia aplicar as leis do movimento browniano desenvolvidas por Einstein e assim obter um valor para N .

Tendo em consideração o primeiro artigo de Einstein sobre esta matéria, Perrin efectuou diversas experiências com diferentes tipos de partículas. Ao analisar os deslocamentos horizontais das partículas, obteve, para os diversos ensaios efectuados, valores aproximados de N , o que o levou a afirmar que: «Esta assinalável concordância prova a rigorosa exactidão da fórmula de Einstein e confirma de forma estonteante a teoria molecular» (1991, p.182). Do seu brilhante livro *Les Atomes*, retirámos a tabela que sintetiza os resultados a que chegou:

100 α	NATURE DE L'ÉMULSION	RAYON des grains.	MASSE $m \cdot 10^{15}$.	DÉPLACEMENTS utilisés.	$\frac{N}{10^{21}}$
1	I. Grains de gomme- gutte.....	μ 0,50	600	100	80
1	II. Grains analogues	0,212	48	900	69,5
4 à 5	III. Mêmes grains dans eau sucrée (35 %) (tem- pérature mal connue)....	0,212	48	400	55
1	IV. Grains de mastic	0,52	650	1 000	72,5
1,2	V. Grains énormes (mastic) dans solution d'urée (27%).....	5,50	750 000	100	78
125	VI. Grains de gomme- gutte dans glycérine (1/10 d'eau).	0,385	290	100	64
1	VII. Grains de gomme- gutte bien égaux.....	0,367	246	1 500	68,8

Figura 71: Tabela relativa aos resultados experimentais obtidos por Perrin, fruto da utilização da teoria formulada por Einstein no seu primeiro artigo sobre o movimento browniano ³⁵

Perrin (1991, p.182) refere que as medidas mais precisas foram obtidas na série VII, onde utilizou grãos de goma-guta iguais. Conhecendo o valor de N , era então possível calcular as dimensões das moléculas e dos átomos. Bastava para isso recorrer a equações como a que foi obtida por Einstein na sua tese de doutoramento, equação (1), ou então as outras, já desenvolvidas no âmbito da teoria cinética dos gases. Para além disso, era possível determinar a massa dos átomos e das moléculas.

Perrin recebeu o prémio Nobel da Física, em 1926, pelo trabalho sobre o movimento browniano.

³⁵ Imagem retirado do livro de Jean Perrin, *Les Atomes* (1991, p.182).

Na tabela apresentada, para cada série, α representa a viscosidade do meio, a o raio dos grãos, m a sua massa e n o número aproximado de deslocamentos utilizados

4.7.2. A sobredeterminação do número de Avogadro

Como vimos, Perrin confirmou magistralmente a teoria que Einstein apresentara no seu primeiro artigo sobre o movimento browniano, obtendo um valor para N . Mas, como é próprio dos grandes cientistas, não se ficou por aí. No seu livro *Les Atomes* apresentou um sumário de todos os métodos utilizados para a determinação de N e que tinham sido testados até à data da primeira publicação do livro (1913). O quadro seguinte, retirado precisamente da sua refrescante obra, traduz o que foi referido.

PHÉNOMÈNES OBSERVÉS	$\frac{N}{10^{22}}$
Viscosité des gaz (équation de Van der Waals).	62
	Répartition de grains 68,3
Mouvement brownien	Déplacements 68,8
	Rotation 65
	Diffusion 69
Répartition irrégulière	Opalescence critique 75
des molécules.....	Bleu du ciel 60 (?)
Spectre du corps noir	64
Charge de sphérules (dans un gaz).....	68
	Charges projetées 62,5
Radioactivité	Hélium engendré 64
	Radium disparu..... 71
	Énergie rayonnée 60

Figura 72: Valores de N obtidos por diferentes meios ³⁶

De acordo com Pais (2004, p.125), é correcto afirmar-se que o debate em torno da realidade atómica e molecular chegou ao fim apenas como resultado dos desenvolvimentos registados no início do século XX. O *terminus* deste debate não ficou somente a dever-se ao primeiro artigo de Einstein sobre o movimento browniano e aos trabalhos posteriores de natureza experimental levadas a cabo por Perrin, mas foi, também, fruto da extraordinária concordância dos valores de N obtidos por muitos meios diferentes e por diferentes cientistas e conceitos. Partindo de temas tão diversos como o movimento browniano, o azul do céu e a radioactividade, foi possível obter um valor aproximado de N . A realidade atómica foi decidida não por uma determinação, mas pela sobredeterminação de N .

³⁶ Imagem retirado do livro de Jean Perrin, *Les Atomes* (1991, p.283).

Perrin, no seu livro, não incluiu o método proposto por Einstein na tese de doutoramento. Como foi referido, uma comunicação de um aluno de Perrin tinha levado Einstein a descobrir um erro na tese. Provavelmente, foi isso que justificou a ausência deste método no livro do físico francês.

Pais (2004) refere que Perrin, ao concluir as suas diversas experiências, terá afirmado o seguinte:

Penso que é impossível que uma mente livre de qualquer preconceito possa reflectir sobre a extrema diversidade dos fenómenos que convergem assim para o mesmo resultado sem experimentar uma forte impressão e que daqui para a frente será difícil defender com argumentos racionais uma atitude hostil para com as hipóteses moleculares. (p.125)

4.7.3. Contributo dado pela explicação do movimento browniano para a clarificação da natureza estatística da segunda lei da termodinâmica

A explicação do movimento browniano foi fundamental para a aceitação generalizada das moléculas e dos átomos. No entanto, como salienta Pais (2004, p.131), «não foi a única coisa, nem, na opinião do próprio Einstein, sequer a mais importante, que a teoria do movimento browniano fez pelo desenvolvimento da física.» Segundo o mesmo autor (2005), em 1917, Einstein terá escrito:

Devido à compreensão da essência do movimento browniano, desapareceram bruscamente todas as dúvidas quanto à correcção da interpretação de Boltzmann das leis da termodinâmica. (p.131)

Quanto a Perrin, após os seus trabalhos sobre o movimento browniano, interessou-se pela natureza estatística da segunda lei da termodinâmica. O movimento browniano concedia, assim, dois importantes contributos aos físicos. Como refere Valente (1999, p.426), “...para além de «materializar» as hipóteses moleculares”, proporcionava “o contacto com fenómenos que têm uma natureza diferente dos fenómenos mecânicos – os fenómenos estatísticos.”

Na descrição do movimento browniano, o comportamento molecular mais esperado e, como tal, mais provável, corresponde ao movimento caótico das moléculas,

rodeando uma partícula browniana, em diferente número e com diferente velocidade. Ainda assim, apesar da mínima probabilidade, existe a possibilidade das moléculas adquirirem o mesmo comportamento médio e ladear a partícula browniana em igual número e com a mesma velocidade média. Como consequência, a partícula browniana não exibiria o seu característico movimento, mantendo-se em equilíbrio ou, conseguindo elevar-se acima do líquido onde se encontrava. Perrin, a partir da provável dança dos grãos de pólen, aproximou-se dos fenómenos estatísticos e, evidentemente, da segunda lei da termodinâmica. Perrin (1991) expôs o assunto da seguinte maneira:

Eis aqui pois uma agitação que se produz indefinidamente sem causa exterior. É claro que esta agitação não contradiz o princípio da conservação da energia. Assegura que o aumento da velocidade de um grão seja acompanhado de um arrefecimento do fluido na sua vizinhança imediata, da mesma forma que toda a diminuição de velocidade é acompanhada de um aquecimento local. Apercebemo-nos simplesmente que *o equilíbrio térmico, não é assim, mais do que um equilíbrio estatístico.*

Mas devemos observar (Gouy, 1988), que o movimento browniano, na realidade indiscutível, confere a certeza experimental às conclusões (tiradas das hipóteses da agitação molecular) de Maxwell, Gibbs e Boltzmann, retirando ao *princípio de Carnot* o lugar de verdade absoluta, reduzindo-o a exprimir somente uma alta probabilidade.

Pode dizer-se que este princípio consiste em afirmar que, num meio em equilíbrio térmico, não pode existir um dispositivo que autorize a transformação em trabalho da energia calorífica do meio. Uma tal máquina permitindo, por exemplo, o movimento de um navio através do arrefecimento da água do mar, e, devido à imensidão das reservas, teria para nós praticamente as mesmas vantagens do que uma máquina permitindo o «movimento perpétuo», isto é o mesmo que dizer que produzimos trabalho sem nenhuma mudança, sem repercussões exteriores. Mas é precisamente este movimento perpétuo de segunda espécie que foi declarado impossível.

Basta observar, dentro de água em *equilíbrio térmico*, uma partícula mais densa do que a água para a ver em certos instantes elevar-se espontaneamente transformando assim em trabalho uma parte do calor do meio ambiente. Se nós fossemos do tamanho das bactérias, poderíamos então fixar ao nível assim atingido o grão de poeira sem ter feito o esforço do elevar e, por exemplo construir uma casa sem pagar a elevação dos materiais.

Mas, quanto maior for a partícula a elevar, mais raro é o caso da agitação molecular a elevar a uma dada altura (...) Imaginemos um tijolo de 1 quilograma suspenso no ar por uma corda. Ele deve possuir um movimento browniano extraordinariamente fraco. Com efeito nós estaremos em breve em condições de calcular o tempo que é preciso esperara para que haja, uma hipótese em duas de ver o tijolo elevar-se por movimento browniano a uma altura de um segundo andar. Encontraremos um tempo (bem superior a duração inimaginável de 10^{1010} anos) comparado com o qual a duração dos períodos geológicos e talvez mesmo a do nosso universo seriam desprezáveis (...) É o mesmo que dizer, como o bom senso

indica, que não será prudente contar o movimento browniano para elevar os tijolos que deveriam servir para a construção de uma casa. (pp.137, 138)

Perrin recorreu ao exemplo da elevação do tijolo para realçar a altíssima improbabilidade de que todos os átomos que constituem o tijolo se organizem por forma a contrariar a segunda lei da termodinâmica. Apesar de alguns dos átomos que embatem no tijolo se poderem organizar, momentaneamente, na mesma direcção e sentido, a probabilidade de que todos se organizem desta maneira, permitindo que o tijolo se eleve espontaneamente, é ínfima, ou como diria Perrin, para que um acontecimento desses se pudesse verificar teríamos de esperar bem mais do que a idade do Universo.

4.8. Das hipóteses atómicas à possibilidade de “contar”, “ver”, “tocar” os átomos

Com Perrin contactámos com a regularidade de uma quantidade idêntica presente em fenómenos muito diferentes. Em todos eles é de realçar a maneira como a teoria e a prática se foram intermediando rumo a um “número mágico”: $N!$

A partir do início do século XX foi, então, possível afirmar que os átomos existiam porque os podíamos contar. Mas, refira-se, já não eram apenas “átomos”, pois as novas descobertas experimentais, como a radioactividade, os raios X e os raios catódicos, vieram pôr em “cena” o electrão e , conseqüentemente, partículas de carga oposta ao electrão. O restante século XX “produziu” um extenso catálogo de partículas, na tentativa de compreender a natureza da radiação e da matéria através da sua interacção.

Os desenvolvimentos tecnológicos permitiram, como já referimos, a partir de meados do século XX, “ver” os átomos. Baeyer (2000) vai mais longe, dizendo que os novos dispositivos ligados aos desenvolvimentos tecnológicos de finais do século XX, abriram-nos a possibilidade de “apalpar” o átomo e penetrar ainda mais no seu misterioso mundo. Este autor (2000, 214) salienta que as novas imagens produzidas, coloridas e tridimensionais, dos átomos, obtidas por STM, permitem-nos “ver” com os nossos próprios olhos que os átomos são lisos, sólidos grãos de matéria, núcleos com dimensões e formas mensuráveis, tal com Lucrecio tinha imaginado. Citando Baeyer (2000):

Atoms have become real objects, like grains of sand and planets. (p.214)

Os átomos são “reais”, contudo, o seu aspecto exterior sólido é apenas aparente. Tal como as extraordinárias descobertas do final do século XIX o prenunciavam, um átomo, por baixo da sua superfície, tem uma complexa e dinâmica estrutura interna.

Ainda há muito por descobrir e conhecer acerca do átomo. As nanotecnologias, o aperfeiçoamento e desenvolvimento de instrumentos que estabeleçam a intermediação entre os nossos sentidos e o mundo atómico poderão contribuir activamente para que possamos cada vez mais “apalpar” o átomo.

“ – *O essencial é invisível para os olhos – repetiu o príncipezinho, para nunca mais se esquecer.*” O átomo foi durante muitos séculos invisível para os nossos olhos, contudo, acrescentamos nós, desde que se “tornou visível” foi mais fácil aceitá-lo, compreendê-lo e manipulá-lo. Ainda assim, e influenciado pelo facto dos átomos terem sido durante muito tempo invisíveis para os nossos olhos (e continuarem a sê-lo directamente), ainda continuamos a falar em teoria ou hipótese atómica. Esta teoria consiste num quadro intelectual de domínios muito vastos da ciência, que podem ser explicados de forma elegante e precisa pela existência de átomos.

Considerações Finais

Considerações finais

No início do século XX, a humanidade assistiu ao “desfecho” de uma odisseia que se estendeu por muitos séculos. A confirmação por demais aguardada surgiria pelas mãos de Einstein e Perrin: **os átomos não são meros modelos imaginados para explicar alguns fenômenos, são entidades que possuem existência física.** A resposta dada, muitos séculos atrás, por Leucipo e Demócrito, à questão formulada por Tales de Mileto – *“Qual é a natureza da matéria?”* – passava então, a partir de 1908, a ter uma fundamentação experimental que lhe conferia um estatuto de realidade física.

A nossa narrativa é bastante limitada, contudo permitiu-nos vivenciar algumas das polêmicas em que o átomo esteve envolvido. Incidimos, em particular, sobre a controvérsia gerada entre Dalton e Gay-Lussac, bem patente na justificação que cada um avançou para a composição da água; e na discussão em torno da realidade atômica no final do século XIX e início do século XX. Atribuímos, também, alguma relevância a uma outra polémica e que está associada à concepção atomística da matéria protagonizada por Demócrito.

A ideia de átomo acompanhou o homem durante largos séculos, contribuindo para o desenvolvimento da mesma visionários homens de diferentes quadrantes. No entanto, só no início do século XIX e pela mão de John Dalton, é que o atomismo saiu do domínio da especulação filosófica e “foi levado” para o laboratório. É a este inglês que se atribui o crédito de ter estabelecido a química moderna nos princípios do atomismo. Muitos outros se seguiram, com especial destaque para Avogadro, cuja «memória» foi (felizmente) recuperada pelo seu compatriota Cannizzaro no famosíssimo congresso de químicos que teve lugar em Karlsruhe, na Alemanha, em 1860.

A determinação do número de Avogadro, N , a partir de uma grande variedade de fenômenos, representou uma ponte de passagem do mundo das dimensões vulgares para o mundo dos átomos. Diversos fenômenos, entre os quais o movimento browniano, permitiram a determinação de N e assim possibilitar a transição do átomo do domínio da hipótese para o da realidade física.

No final do século XIX, o principal ponto de debate entre os cientistas consistia em saber se os átomos eram entidades reais ou simples modelos imaginados. O sucesso alcançado pela teoria cinética, desenvolvida por Clausius, Maxwell e Boltzmann, mostrou a eficiência da teoria atômica. Contudo, só em 1905 foi dado o passo decisivo,

quando Einstein escreveu o seu primeiro artigo sobre o movimento browniano. A interconexão entre teoria e evidência experimental, assim como, o recurso a analogias (ver p.193, 194), foram determinantes para o caminho traçado por Einstein rumo à explicação do movimento browniano e posterior aceitação da realidade física dos átomos.

A “estucada final” ficaria a cargo de Perrin, que em 1908 e a partir da teoria do movimento browniano desenvolvida anos antes por Einstein, conseguiu determinar experimentalmente o valor de N . Sabendo o valor de N , foi então possível determinar as dimensões das moléculas e dos átomos. O magistral trabalho de Perrin tratou-se, de facto, daquilo que mais se aproximou duma observação directa de átomos. Apesar destes não poderem ser visualizados, era possível, pelo menos, observar os efeitos das suas colisões e calcular, a partir de dados empíricos, as respectivas dimensões.

Perrin expôs o seu trabalho sobre o movimento browniano em *Les Atomes* que contém, na edição utilizada, um *post mortem* sobre as lutas travadas em torno da realidade atómica:

A teoria atómica triunfou. Numerosos até há pouco, os seus adversários, conquistados finalmente, renunciaram, um após outro, às dúvidas que durante muito tempo foram legítimas e, sem dúvida, úteis. É a respeito de outras ideias que prosseguirá de ora em diante o conflito dos instintos de prudência e da audácia cujo equilíbrio é necessário ao lento progresso da ciência humana.

Mas neste futuro vemos desvanecer-se o que a teoria primitiva tinha de definitivo e de absoluto. Os átomos não são elementos eternos e indivisíveis de que a irreduzível simplicidade determinava tanto quanto possível um limite e, na sua inimaginável pequenez, começamos a pressentir uma agitação prodigiosa de mundos novos. (pp. 284, 285)

Ao mesmo tempo que o atomismo era finalmente aceite como um facto estabelecido, o átomo, ele próprio, deixou de ser átomo. Mas isso ficará para uma outra aventura...

A recompensa de um estudo histórico

Em virtude do nosso percurso académico, já existia a convicção de que a História e Filosofia da Ciência poderia trazer vários benefícios ao nível da formação. No decorrer do estudo histórico que efectuámos, e que culminou com a elaboração da «Aventura do Átomo», reforçámos toda essa convicção.

A importância que a História e Filosofia da Ciência poderá ter no ensino das ciências mereceu especial destaque na primeira parte do nosso trabalho. Aqui, apresentaram-se algumas reflexões centradas, essencialmente, nas vantagens que a utilização de um instrumento metodológico desta natureza poderá ter no âmbito do ensino construtivista das ciências. Após a realização deste trabalho, apraz-nos concluir que uma experiência de investigação nesta área possibilita uma verdadeira utilização pedagógica da História e Filosofia da Ciência, com ênfase nos problemas, nas polémicas e na imaginação.

O estudo histórico que efectuámos contribuiu activamente para reforçar e revitalizar a nossa relação com o conhecimento científico, nomeadamente, com alguns dos vastíssimos domínios da teoria atómica. Ao longo do nosso trabalho, procurámos promover a valorização das ideias, em concreto, a ideia de átomo. Uma consciência do valor das ideias é indispensável para que se possam abordar alguns aspectos relacionados com a ciência e com a natureza do conhecimento científico.

O exercício de coeitura e contra-leitura que efectuámos foi determinante para a construção da «Aventura do Átomo», pois proporcionou-nos um enriquecedor contacto com obras que exibem o “valor”, o “poder” e a “beleza” de alguns conceitos científicos associados à teoria atómica. Este contacto permitiu-nos desenvolver uma narrativa histórica que evidencia os problemas, levanta questões, humaniza e ajudar a experienciar a ciência como uma construção humana singular. Todos estes atributos possibilitam que a ideia de átomo adquira significado e interesse.

Ao longo da realização do presente trabalho, apoderaram-se de nós uma miscelânea de sentimentos. Vivemos momentos de alegria, tristeza, desespero e êxtase, no entanto, e apesar destes diferentes estados de espírito, podemos afirmar que chegámos ao fim, atingindo os objectivos a que nos propusemos. Devemos transmitir aos nossos alunos que ao longo do seu percurso estudantil, nomeadamente no campo das ciências, encontrarão muitos obstáculos que terão de aprender a contornar. Uma das

frases que mais nos marcou, influenciando a nossa actividade enquanto docentes, foi proferida por um professor durante a nossa formação académica – “*Aprender dói, aprender custa e é um trabalho árduo*”. Conscientes da importância desta frase para o sucesso escolar dos alunos e atendendo à preocupante realidade por que passa a aprendizagem das ciências, o presente trabalho não pretende ser apenas um placebo, mas sim um *complexo vitaminado* que torne a aprendizagem da disciplina pela qual nos apaixonámos, a Física, mais atractiva e repleta de significação.

Implicações para a formação de professores

De entre os manuais escolares utilizados, verificámos que a história presente nos mesmos não realça o papel que a imaginação científica desempenhou e desempenha no desenvolvimento do conhecimento científico. Para além disso, a abordagem histórica efectuada ao conceito de átomo é dogmática e desprovida de valor pedagógico. A «Aventura do Átomo» poderá constituir uma narrativa que, de entre outros aspectos, complemente a história que encontramos nos manuais escolares. Podemos afirmar que a narrativa desenvolvida tem valor pedagógico já que evidencia a origem dos problemas, dá relevo às controvérsias e mostra como a interacção entre teoria e experimentação foi fundamental no desenvolvimento da ideia de átomo.

Langevin (1904) defendia que a educação científica deveria centrar-se em torno de grandes princípios. Para ele deveria organizar-se em torno dos dois princípios da termodinâmica e do princípio atómico da matéria. Com efeito, ele afirmava que a síntese atómica tinha promovido o átomo de hipótese para o estatuto de princípio (p.292).

A questão sobre a realidade dos átomos continua a ter sentido? Será que os átomos existem? A nossa resposta foi alimentada pelos desenvolvimentos científicos e tecnológicos que foram apontando soluções às questões. A quantidade de saberes e de imaginação que se foram jogando na procura dessas soluções podem ser utilizadas para cultivarmos a ideia de “*taming the atom*”.

Com a nossa dissertação procurámos exhibir os valores que caracterizam o Principezinho, de Saint-Exupéry – persistência, curiosidade e disponibilidade para o conhecimento. A ideia de “*taming the atom*” de Baeyer, inspirada em Saint-Exupéry, é uma boa metáfora a ter em conta na construção do conhecimento, pois permitiu iluminar

de uma forma nova a nossa experiência. Estamos convictos que, desta forma, a viagem que propomos rumo ao “mundo encantado” do átomo, possibilitará “criar laços” com a realidade atômica. No entanto, não nos podemos esquecer que, para que o átomo se torne especial, é necessário perder tempo a conhecê-lo!

A plataforma multimédia ainda se encontra em fase de construção e será alvo de atenção especial no futuro próximo.

Trabalho futuro

A partir do conceito de átomo é possível elaborar um sem número de aventuras. A abrangência da temática em causa é de tal ordem, que qualquer abordagem que se decida efectuar pecará sempre por ser escassa. Assim, na nossa «Aventura do Átomo» abordámos algumas etapas do caminho traçado pelo átomo até à sua afirmação enquanto realidade física.

O desejo de saber mais sobre a teoria atômica foi aumentando dia após dia. Quanto mais avançávamos no nosso trabalho, mais sedentos ficávamos por explorar mais detalhadamente diversos assuntos. Alguns desses despertaram o nosso interesse para trabalhos futuros:

- A revolução quântica iniciada por Planck e protagonizada por Einstein;
- A “batalha” travada em torno do tubo de raios catódicos;
- A estrutura interna do átomo e a dualidade do electrão;
- Desenvolvimento da plataforma multimédia;
- Validação empírica da narrativa e da plataforma multimédia.

Bibliografia

Allchin D. (2004). *Pseudohistory and Pseudoscience*. Science & Education, 13, 179-195.

Allègre, Claude (2005). *Um pouco de ciência para todos*. Lisboa: Gradiva. (Trabalho original em francês publicado em 2003).

Ashall, Frank (2001). *Descobertas Notáveis! Do infinitamente grande ao infinitamente pequeno*. Lisboa: Editora Replicação. (Trabalho original em inglês publicado em 1994).

Asimov, Isaac (2004). *Átomo*. Porto: Campo das Letras.

Asimov, Isaac (1987). *O Universo da Ciência: Os Elementos, as Partículas, as Ondas, a Máquina, o Reactor* (1ª ed.). Lisboa: Editorial Presença. (Trabalho original em inglês publicado em 1984)

Atkins, P. W. (2001). *O Reino dos Elementos*. Lisboa: Rocco – Temas e Debates (Trabalho original em inglês publicado em 1995).

Auffray, Jean-Paul (2001). *O Átomo*. Lisboa: Instituto Piaget (Trabalho original em francês publicado em 1997).

Azevedo, Mário (1994). *Teses, relatórios e trabalhos escolares – sugestões para a sua elaboração*. Lisboa: Publicações da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa – Departamento de Educação.

Baeyer, Hans (2000). *Taming the Atom – the Emergence of the Visible Microworld*. Mineola, Nova Iorque: Dover Publications.

Balibar, F. (1988). *Einstein: Uma leitura de Galileu e Newton*. Lisboa: Edições de 70. (Trabalho original em francês publicado em 1984).

Baptista, António Manuel (1998). *A Ciência no Grande Teatro do Mundo*. Lisboa: Gradiva.

Berg, Kevin C. de (2006). *The Kinetic-Molecular and Thermodynamic Approaches to Osmotic Pressure: A Study of Dispute in Physical Chemistry and the Implications for Chemistry Education*. *Science & Education*, 15, 495-519.

Bertolami, Orfeu & Páramos, Jorge (2005). *Einstein e a descrição unificada da Natureza*. *Gazeta de Física*, pp. 4-11.

Bevilacqua, F., Giannetto, E. & Mathews, M. R. (2001). *Science education and culture – the contribution of History and Philosophy of Science*. Kluwer Academic Publisher.

Bodanis, David (2001). *E = mc²: A Biografia da Equação mais Famosa do Mundo*. Lisboa: Gradiva. (Trabalho original em inglês publicado em 2000).

Bravo, Agustín A. & Aymerich, Mercè I. (2005). *Utilising the '3P-model' to Characterise the Discipline of Didactics of Science*. *Science & Education*, 0, 29–41.

Bruner, Jerome (2000). *Cultura da Educação*. Lisboa: Edições 70. (Trabalho original em inglês publicado em 1996).

Caamaño, A. (1996). *La comprensión de la naturaleza de la ciencia. Un objetivo de la enseñanza de las ciencias en ESO*. In *Alambique*. Didáctica de las ciencias experimentales, publicação trimestral, número 8, ano III.

Café, Carlos (2002). *Eles não sabem que eu sonho... Um jovem poeta no país da Ciência*. Porto: Edições Asa.

Cardwell, D.S.L (1989). *James Joule*. Manchester: Manchester University Press.

Cartwright, N. (1999). *The Dappled World – A Study of the Boundaries of Science*. Cambridge: University Press.

-
- Carvalho, A. M. & Vannucchi, A. I. (2000). *History, Philosophy and Science Teaching: Some answers to "How"?* Science & Education, 9, 427-448.
- Carvalho, Rómulo de (1989). *A Natureza Corpuscular da Matéria* (2.^a ed.). Lisboa: Sá da Costa Editora.
- Carvalho, Rómulo de (1975). *História do átomo*. Coimbra: Atlântida Editora.
- Cavaleiro, M. Neli G. C. & Beleza, M. Domingas (2003). *FQ Sustentabilidade na Terra – 3º ciclo do Ensino Básico*. Porto: Edições Asa.
- Chang, Raymond (1994). *Química*, 5.^a edição. Lisboa: McGraw-Hill.
- Coelho, Hélio T. & Ferreira, Ricardo (2006). *Annus Mirabilis de Einstein: artigos que revolucionaram a Física*. Gazeta de Matemática n.º 150, pp. 29-39.
- Costa, Maria Inês Tavares da (2005). *Um Romance da Entropia: contributo para a construção de uma narrativa histórica com valor pedagógico*. Tese de mestrado não publicada, Universidade de Évora, Évora.
- Cugota, Lluís & Roldán, Gustavo (2005). *Chamo-me Albert Einstein*. Lisboa: Didáctica Editora. (Trabalho original em espanhol publicado em 2004).
- Davies, Paul & Brown, J. R. (1991). *O átomo assombrado*. Lisboa: Gradiva. (Trabalho original em inglês publicado em 1986).
- Ferreira, Vítor F. (1998). *As Tecnologias Interactivas no Ensino*. Química Nova. Rio de Janeiro.
- Figueiredo, Teresa Tasso de (2003). *EUREKA! CFQ Sustentabilidade na Terra*. Lisboa: Texto Editora.
- Fiolhais, Carlos (2005). *Curiosidade apaixonada*. Lisboa: Gradiva.

Fiolhais, Carlos (2002). *A coisa mais preciosa que temos*. Lisboa: Gradiva.

Fouché, Johann (1995). *An Interactive Multimedia Program for the Teaching of Electrical Principles to Senior Secondary Pupils*. Mini-dissertation to confer the degree of Magister Educationis. Faculty of Education, University of Pretoria.

Galilei, Galileu (2001). *Diálogo sobre os Dois Maiores Sistemas do Mundo*. Ptolomaico § Copernicano. Discurso editorial.

Gil, Fernando B. (2006). *A Física em Portugal à volta do “Annus Mirabilis”*. *Gazeta de Matemática* n.º 150, pp. 4-11.

Gonçalves, R. (2003). *A conquista do átomo*. Apontamentos utilizado nas aulas da disciplina de Temas de Física Clássica do mestrado em Física para o Ensino. Universidade de Évora.

Gonçalves, R. (1997). *Ciência, Pós-ciência, Metaciência: tradição, inovação e renovação* (2ª ed.). Lisboa: Terramar.

González, Inés P. (2003). *El hombre que pesó los átomos – Dalton*. Tres Cantos: Nivola libros y ediciones.

Hegngi, Yolanda N. (1997). *On-line teaching and learning: a description of the development of the media technology and diversity online course and its electronic discourse analysis*. Dissertation to confer the degree of Doctor. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute & State University. Blacksburg, Virgínia.

Heilbron (2001). *History in Science Education, with Cautionary Tales about the Agreement of Measurement and Theory*. *Science Education and Culture*, 5-15.

Hershey, David R. (2006). *Pseudohistory and Pseudoscience: Corrections to Allchin’s Historical, Conceptual and Educational Claims*. *Science & Education*, 15, 121-125.

Holton, Gerald et al. (1980). *Projecto Física, Unidade 3 – O Triunfo da Mecânica*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.

Izquierdo, M. (1996). *Relación entre la historia y la filosofía de la ciencia y la enseñanza de las ciencias*. In Alambique. Didáctica de las ciencias experimentales, publicação trimestral, número 8, ano III.

Janeira, A. L. (1993). *Condições de possibilidade em História e Filosofia das Ciências*. Revista de Educação, vol. III, n.º 2, pp. 3-8.

Janeira, A. L. (1985). *Filosofia das Ciências: Faces e interfaces de uma disciplina*. Revista Portuguesa de Filosofia, pp. 1-23.

Karakostas, Vassilios & Hadzidaki, Pandora (2005). *Realism vs. Constructivism in Contemporary Physics: The Impact of the Debate on the Understanding of Quantum Theory and its Instructional Process*. Science & Education, 14, 607-629.

Kindi, Vasso (2005). *Should Science Teaching Involve the History of Science? An Assessment of Kuhn's View*. Science & Education, 14, 721-731.

Koestler, Arthur (1969). *The act of creation*. Picador

Kragh, Helge (2001). *Introdução à Historiografia da Ciência*. Porto: Porto Editora. (Trabalho original em inglês publicado em 1987).

Kruckeberg, Robert (2006). *A Deweyan Perspective on Science Education: Constructivism, Experience, and Why We Learn Science*. Science & Education, 15, 1-30.

Kubbinga, Henk (2006). *A tribute to Boltzmann*. Europhysicsnews, volume 37, number 6, pp 28-29.

Kubli, Fritz (2005). *Science Teaching as a Dialogue – Bakhtin, Vygotsky and some Applications in the Classroom*. Science & Education, 14, 501-534.

Kubli, Fritz (2001). *Can the Theory of Narratives Help Science Teachers be Better Storytellers?* *Science & Education*, 10, 595-599.

Lage, Eduardo (2005). *O Centenário do Quantum de Luz*. *Gazeta da Física*, Volume 28, Fascículo 1, pp. 4 – 9.

Langevin, Paul (2000). *L'esprit de l'enseignement scientifique*. *Physique et Humanités Scientifiques*. Paris: Presses Universitaires du Septentrion.

Lawson, Anton E. (2004). *A Reply to Allchin's "Pseudohistory and Pseudoscience"*. *Science & Education*, 13, 599-605.

Leite, L. (2002). *History of Science in Science Education: Development and Validation of a Checklist for Analysing the Historical Content of Science Textbooks*. *Science & Education*, pp. 11, 333 – 359.

Maciel, Noémia & Miranda, Ana (2004). *Eu e o Planeta Azul – Viver melhor na Terra*. Porto: Porto Editora.

Mackintosh, Ray et al. (2003). *Núcleo – Uma viagem ao coração da matéria*. Porto: Porto Editora. (Trabalho original em inglês publicado em 2001).

Maneta, Luís (2006). *Prémio Rómulo de Carvalho – Universidade de Évora distingue cultura científica*. *Diário do Sul* nº 10055, pp. 3.

Mathews, Michael R. (1994). *Science Teaching – The role of History and Philosophy of Science*. Londres, Nova Iorque: Routledge.

Meleiro, A. & Giordan, M. (1999). *Hipermídia no ensino de modelos atômicos*. *Química Nova na Escola*, 10, pp. 17-20.

Mellado, Vicente et al. (2006). *Contributions from the Philosophy of Science to the Education of Science Teachers*. *Science & Education*, 15, 419-445.

-
- Mendonça, Lucinda S. et al. (2004). *TERRA MÃE CFQ – Viver Melhor na Terra*. Lisboa: Texto Editora.
- Miller, A. (2001). *Einstein, Picasso*. New York: Basic Books.
- Morgado, Joaquim & Morgado, Glória L. (2004). *Ser com Saber*. Lisboa: Plátano Editora.
- Morrison, Philip & Morrison, Phylis (2002). *Potências de Dez – O mundo às várias escalas*. Porto: Porto Editora. (Trabalho original em inglês publicado em 1982).
- Neto, António (2003). *Linguagem e Comunicação: Aprendizagem e Desenvolvimento*. Texto utilizado nas aulas da disciplina de Didáctica das Ciências Físico-Químicas do mestrado em Física para o Ensino. Universidade de Évora.
- Neto, António (2003). *Didáctica da Mecânica e Didáctica da Física: Interfaces Múltiplas, Sinergias Várias*. Texto utilizado nas aulas da disciplina de Didáctica das Ciências Físico-Químicas do mestrado em Física para o Ensino. Universidade de Évora.
- Neto, António (2002). *Interfaces Várias, Sinergias Múltiplas: Para uma Didáctica Reconstruída*. Texto utilizado nas aulas da disciplina de Didáctica das Ciências Físico-Químicas do mestrado em Física para o Ensino. Universidade de Évora.
- Neto, António (1998). *Resolução de problemas em Física: Conceitos, processos e novas abordagens*. Lisboa: Instituto de Inovação Educacional
- Oliveira, J. L. & Silva, E. (1997). *Einstein – Vida e Pensamentos*. São Paulo: Editora Martin Claret Lda.
- Paavola, Sami & Hakkarainen, Kai. *The Knowledge Creation Metaphor – An Emergent Epistemological Approach to Learning*. *Science & Education*, 14, 535-557.
- Pais, Abraham (2004). *Subtil é o Senhor: vida e pensamento de Albert Einstein* (2.^a ed.). Lisboa: Gradiva (Trabalho original em inglês publicado em 1982).

- Paiva, Jacinta (2002). *As Tecnologias de Informação e Comunicação: utilização pelos professores*. Lisboa: Ministério da Educação.
- Paiva, João (2004). *A fusão feliz*. Boletim da Sociedade Portuguesa de Química, 92.
- Paiva, João (2005). *As TIC no ensino das ciências Físico-Químicas*. Sessão Plenária, Encontro de Educação em Física: O ensino da Física no século XXI, Braga.
- Pedrinaci, E. (1996). *Por unas fructíferas relaciones entre la historia, la filosofía de la ciencia y la educación científica*. In Alambique. Didáctica de las ciencias experimentales, publicação trimestral, número 8, ano III.
- Peña, Teresa & Deus, J. D. (2006). *Ensino das Ciências: Reflexões e Comparações*. Gazeta de Física, vol. 29, pp.32-37.
- Pereira, Alexandre & Poupa, Carlos (2003). *Como escrever uma tese, monografia ou livro científico usando o Word (2.^a ed.)*. Lisboa: Sílabo.
- Perrin, Jean (1991). *Les Atomes*. France: Flammarion. (Prefácio de Pierre-Gilles de Gennes)
- Popper, Karl (s/d). *O Futuro está Aberto (2.^a ed.)*. Lisboa: Editorial Fragmentos.
- Purrington, Robert D. (1997). *Physics in the Nineteenth Century*. Nova Brunswick, Nova Jersey, Londres: Rutgers University Press.
- Roscoe, Keith (2004). *Lonergan's Theory of Cognition, Constructivism and Science Education*. Science & Education, 13, 541-551.
- Rutherford, F. J. (2001). *Fostering the History of Science in American Science Education*. Science & Education, 10, 569-580.
- Saint-Exupéry, Antoine de (1987). *O Príncipezinho*. Lisboa: Editora Caravela.

-
- Sampieri R., Collado C., Lucio P. *Metodología de la Investigación*. McGraw-Hill.
- Santos, J. J. Andrade dos (1946). *O Átomo na Filosofia, na Química e na Física*. Lisboa: Centro Bibliográfico.
- Seroglou, F. & Koumaras, P. (2001). *The Contribution of the History of Physics in Physics Education: A Review*. *Science & Education*, 10, 153-172.
- Shapin, Steven (1999). *A Revolução Científica*. Algés: Difel – Difusão Editorial. (Trabalho original em inglês publicado em 1996).
- Solbes, J. & Traver, M. J. (1996). *La utilización de la Historia de las Ciencias en la enseñanza de la Física y la Química*. *Enseñanza de las ciencias*, 14 (1), 103-112.
- Solbes, J. & Traver, M. J. (2001). *Resultados obtenidos introduciendo Historia de la Ciencia en las clases de Física y Química: Mejora de la imagen de la ciencia y desarrollo de actitudes positivas*. *Enseñanza de las ciencias*, 19 (1), 151-162.
- Solbes, J. & Traver, M. J. (2003). *Against a Negative Image of Science: History of Science and Teaching of Physics and Chemistry*. *Science & Education*, 12, 703-717.
- Solís, Carlos & Sellés, Manuel (2005). *Historia de La Ciencia*. Madrid: Editorial Espasa Calpe, S.A.
- Stachel, John (2005). *O Annus Mirabilis de Einstein: cinco artigos que revolucionaram a física*. Lisboa: Gradiva. (Trabalho original em inglês publicado em 1998).
- Stiefel, B. M. (1996). *Aproximación didáctica a textos originales*. In *Alambique*. *Didáctica de las ciencias experimentales*, publicação trimestral, número 8, ano III.
- Stuewer, Roger H. (2006). *Historical Surprises*. *Science & Education*, 15, 521-530.
- Thomaz, Manuel Fernandes (2002). *A física no fim do século XIX*. *Gazeta de Física*, Volume 25, Fascículo 2, pp.16 – 22.

Thomson, Sir George (1964). *O átomo*. Lisboa: Publicações Europa – América. (Trabalho original em inglês publicado em 1961).

Tipler, Paul (1995). *Física, Volume 2 – Gravitação, Ondas e Termodinâmica* (3.^a ed.). Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora. (Trabalho original em inglês publicado em 1991).

Tseitlin, Michael & Galili, Igal (2006). *Science Teaching: What Does it Mean?* *Science & Education*, 15, 393-417.

Valente, M. (1998). *Duas visões sobre o conhecimento do mundo: a “controvérsia” entre Planck e Mach olhada pela Pedagogia*. In Seminário sobre o positivismo. Évora: Centro de Estudos de História e Filosofia da Ciência.

Valente, M. J. (1999). Uma leitura pedagógica da construção histórica do conceito de energia: Contributo para uma didáctica crítica. Tese de doutoramento não publicada, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa.

Vargish, T. & Mook, D. (1999). *Inside Modernism – Relativity Theory, Cubism, Narrative*. New Haven and London: Yale University Press

Videira, A. L. Leite (1997). *Da Certeza à Incerteza – Meio Século de Física em Mudança*. Évora: Publicações Universidade de Évora.

Vincent B. B. & Stengers I. (1993). *Histoire de la Chimie*. Paris : Ed. de la Découverte.

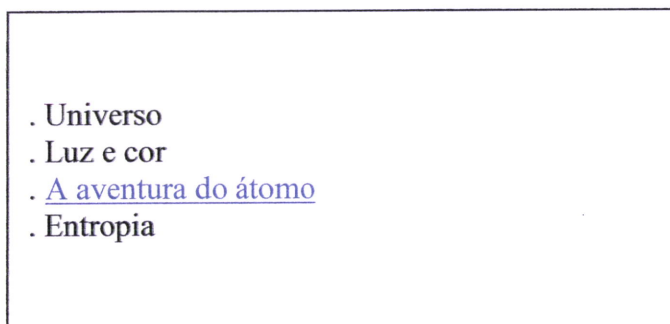
Wang, H. A. & Marsh, D. D. (2002). *Science Instruction with a Humanistic Twist: Teachers’ Perception and Practice in Using the History of Science in Their Classrooms*. *Science & Education*, 11, 169-189.

Anexos

Anexo 1

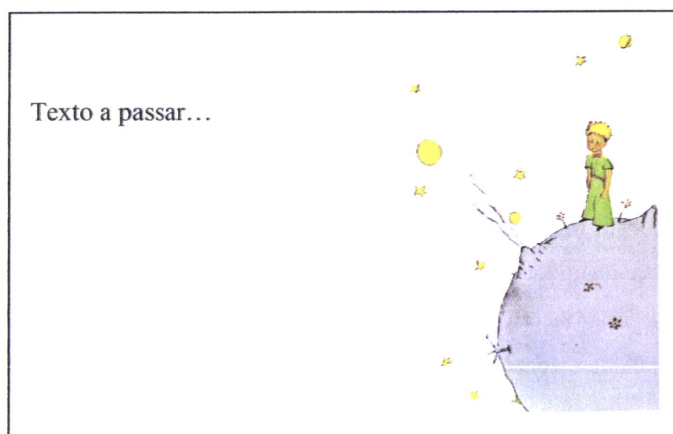
Estrutura da aplicação multimédia (1ª parte)

1 - Página inicial



2 - Introdução (pequeno filme animado, acompanhado de um texto)

- Inicialmente surge o Príncipezinho no seu asteróide. De seguida apanha *boleia* de um bando de pássaros selvagens e desaparece do ecrã.



2.1. Texto que surge na introdução acompanhando o Príncipezinho

Na aplicação aparece a animação do Príncipezinho no seu asteróide. Logo a seguir e antes de ele seguir viagem com os pássaros, vai surgindo o texto do lado esquerdo (o mais apelativo possível e sem ser muito lento – por exemplo: tipo Guerra das estrelas ou como quando acabam os filmes). Só quando o texto terminar é que o Príncipezinho segue viagem com os pássaros. Depois de ser largado pelos pássaros e a sua imagem sair do ecrã, passa directamente para o portal 3D.

Texto:

Certamente já conheces o *Príncipezinho* de outra aventura. Sim, esse mesmo! A personagem que dá nome à magistral obra de Saint-Exupéry. A mensagem que este autor nos transmite é intemporal porque foca as relações e os sentimentos entre as pessoas e, acima de tudo, faz-nos pensar em pequenas coisas que tornariam o mundo mais belo. Os valores que caracterizam o Príncipezinho são prova disso mesmo, onde a amizade, a sensibilidade, a imaginação, a persistência e a curiosidade têm lugar de destaque.

Nessa aventura o Príncipezinho percebeu o significado de estabelecer laços com alguém. Em termos gerais, compreendeu que o conhecimento que temos do outro será sempre mais profundo e completo se a relação estabelecida for permanentemente alimentada, nutrida e repleta de muita perseverança, paciência e dedicação.

A conquista do átomo, alcançada depois de muitas “batalhas” comandadas por audaciosos cientistas e pensadores, onde muitos destes visionaram o que os seus olhos não viam e as suas mãos não conseguiam sentir, constitui, sem dúvida, um dos feitos mais extraordinários da história da humanidade. Na nossa aventura, o Príncipezinho vai acompanhar-te rumo ao “mundo encantado” do átomo, ajudando-te a “criar laços” com a realidade atómica. Acompanha-o, sendo fiel aos seus valores – persistência, curiosidade e vontade de aprender e conhecer. Não te esqueças, para que o átomo se torne especial, é necessário *perderes* tempo a conhecê-lo.

Como a raposa revelou, na obra de Saint-Exupéry, ao Príncipezinho: “... É o tempo que *perdeste* com a tua rosa que torna a tua rosa tão importante...”.

Na realidade, não perdes tempo, ganhas....

Anexo 2

Estrutura da aplicação multimédia (2ª parte)

1 - Portal 3D

- O Príncipezinho (agora em 3D), está no portal 3D. O fundo do mesmo deve ser como o da figura 1. Para além disso, também terá menus, com imagens 3D a saírem desses menus (tal como está representado nas figuras 1 e 2).

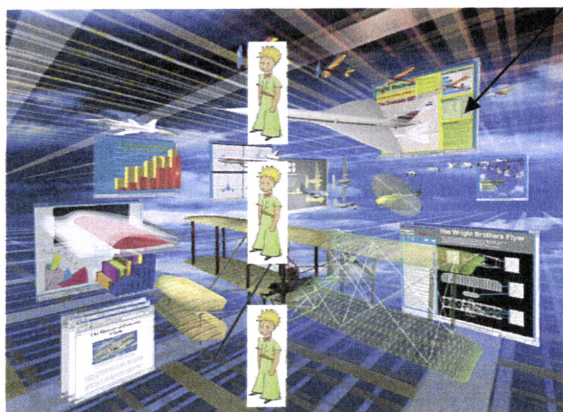


Fig.1

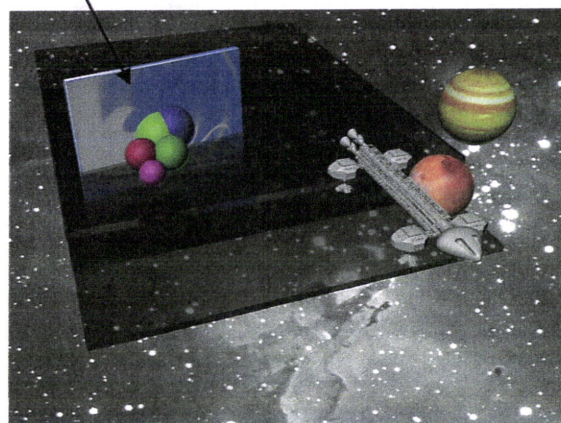


Fig.2

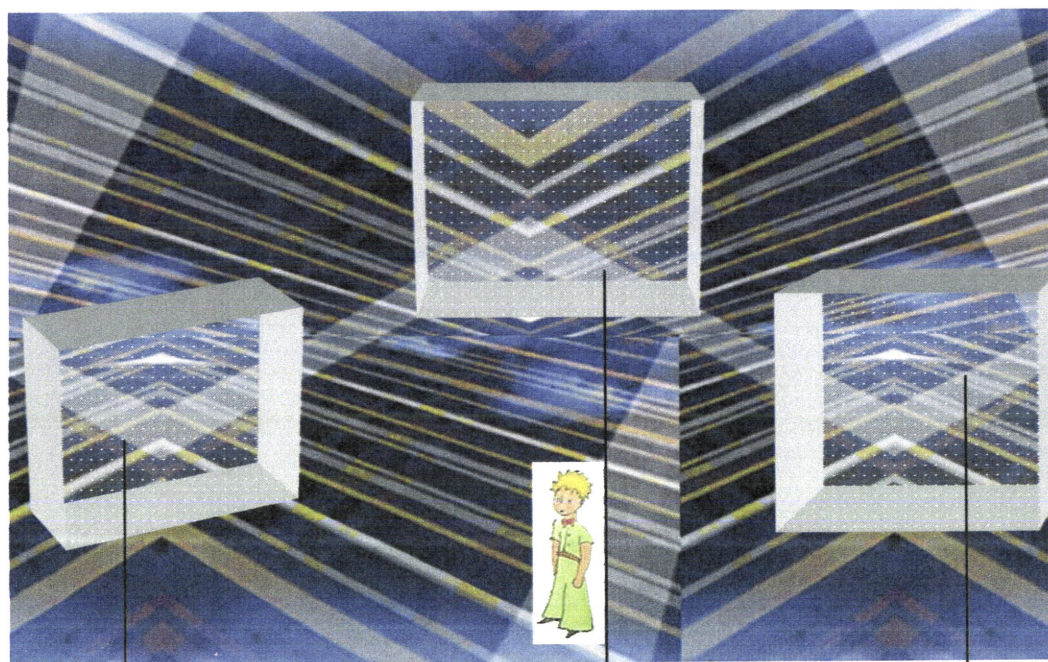
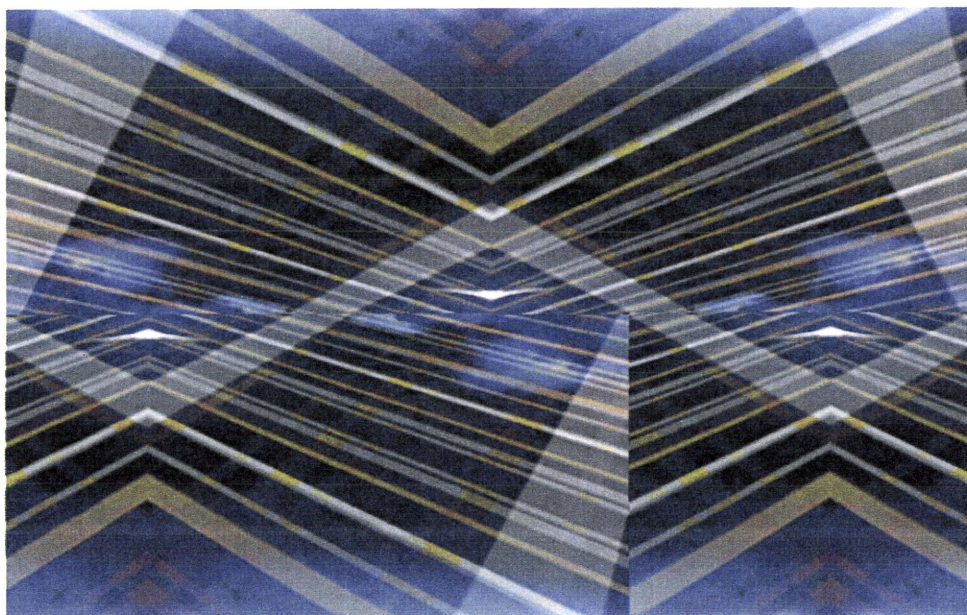
2 - Selecção de menus

- Ao seleccionarmos um menu, o Príncipezinho caminha e entra para dentro desse menu (fig.3).



Fig.3

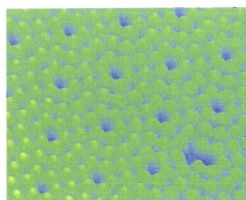
3 - Menus



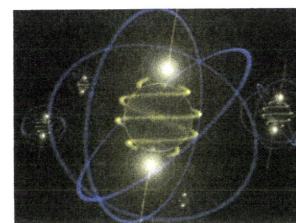
O movimento browniano



Átomos..., como sabemos que eles existem?

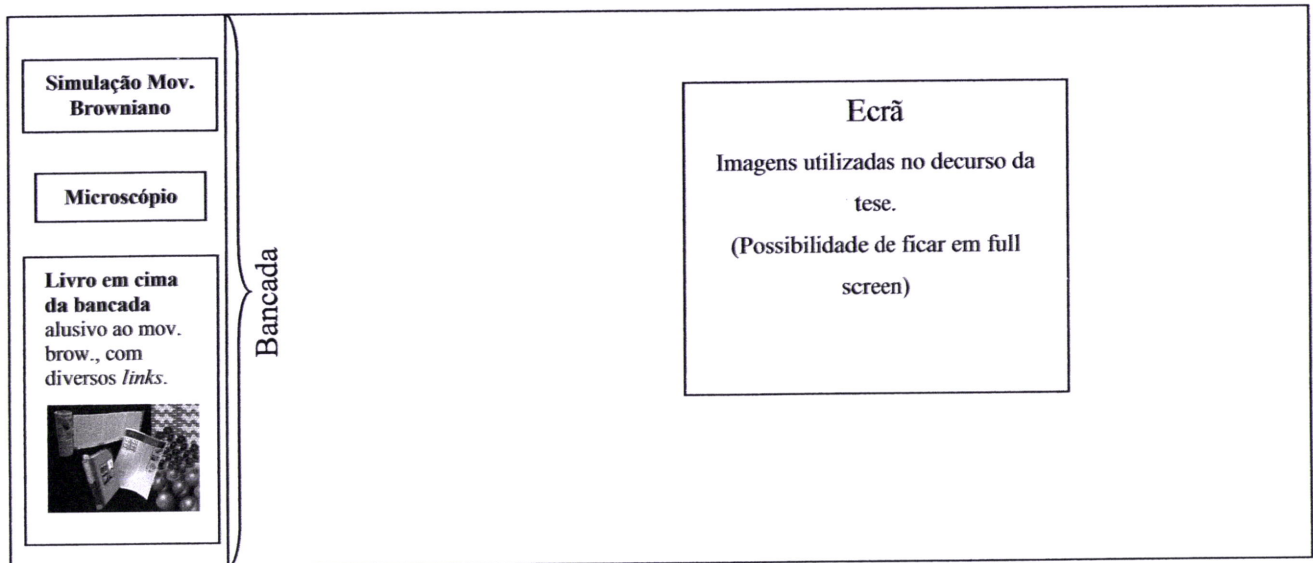


Mais acerca do átomo



4 - Menu “O movimento browniano”

- Nesta fase o Príncipezinho já não aparece. O utilizador agora “vê” pelos olhos do Príncipezinho, que está numa exposição alusiva ao movimento browniano.



2