



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Ciências Sociais

Instituto de Filosofia e Ciências Humanas

Carlos Fils Puig

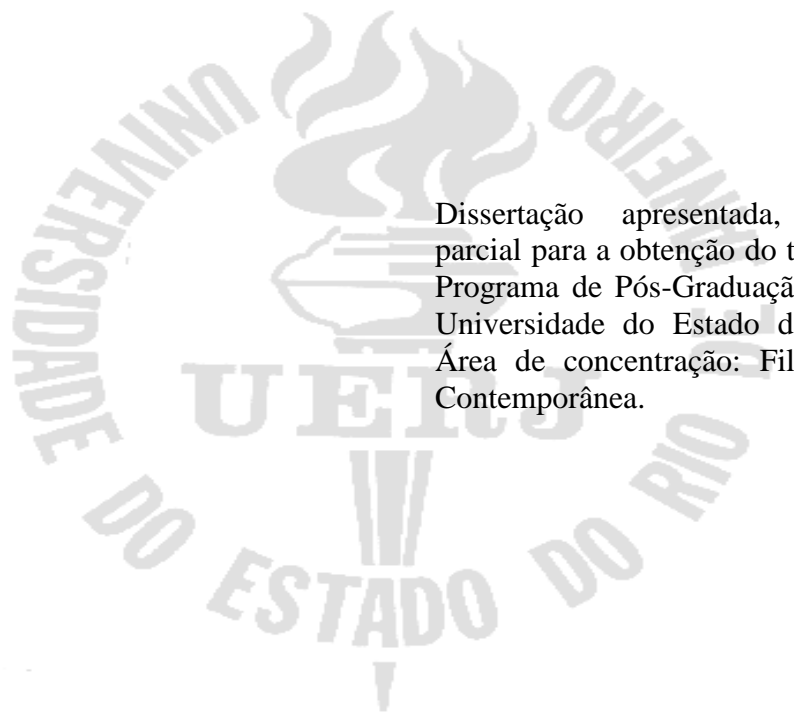
**James Clerk Maxwell e a unidade do mundo:  
modelos e metáforas na construção de teorias científicas**

Rio de Janeiro

2014

Carlos Fils Puig

**James Clerk Maxwell e a unidade do mundo:  
modelos e metáforas na construção de teorias científicas**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Filosofia Moderna e Contemporânea.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Augusto Passos Videira

Rio de Janeiro

2014

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ/REDE SIRIUS/ BIBLIOTECA CCS/A

M451 Puig, Carlos Fils.

James Clerk Maxwell e a unidade do mundo:  
modelos e metáforas na construção de teorias  
científicas / Carlos Fils Puig. – 2014.

105 f.

Orientador: Antonio Augusto Passos Videira.

Dissertação (mestrado) - Universidade do Estado  
do Rio de Janeiro, Instituto de Filosofia e Ciências  
Humanas.

Bibliografia.

1. Maxwell, James Clerk, 1831-1879. 2.  
Eletromagnetismo – Teses. 3. Física – Teses. I.  
Videira, Antonio Augusto Passos. II. Universidade do  
Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Filosofia e  
Ciências Humanas. III. Título.

CDU 537.8

Autorizo apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta  
dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Carlos Fils Puig

**James Clerk Maxwell e a unidade do mundo:  
modelos e metáforas na construção de teorias científico**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Filosofia Moderna e Contemporânea.

Aprovada em: 18 de fevereiro de 2014.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Antonio Augusto Passos Videira (Orientador)  
Instituto de Filosofia e Ciências Humanas – UERJ

---

Prof. Dr. André Luís de Oliveira Mendonça  
Instituto de Medicina Social – UERJ

---

Prof. Dr. Fernando Fragozo  
Escola de Comunicação – UFRJ

Rio de Janeiro

2014

## **DEDICATÓRIA**

Aos companheiros,  
sem vocês, esta não seria possível.

À Doutora em Filosofia  
Evelyn Anny Fils de Puig,  
minha mãe, *in memoriam*.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Doutor Antonio Augusto Passos Videira, antes de tudo amigo e companheiro.

Aos colegas do grupo Estudos Sociais e Conceituais de Ciência, Sociedade e Tecnologia (Jaguar): André Mendonça, Fernando Fragozo, Rogério Tolfo, William Martins, Thomson Lemos, Maria Helena Silva Soares, Davi Gil, André Philot, Aécio Oliveira, Erika Takimoto, Pricila Araújo, Leonardo Miguel, Juliana Flores, Camila Lantiman, Cristina Mota, Verusca Reis, Cristina Machado, Juan Queijo e Rafael Vaz, pela troca incomensurável.

Ao meu pai, Luis Puig Soler, aos colegas e amigos, e à Lise Bianchini, pelo apoio e incentivo.

Ao meu irmão, Daniel Puig, pela troca de ideias e bibliografias, o apoio e companheirismo.

À CAPES, pela bolsa recebida durante o curso de mestrado.

De um lado, o ponto de vista dos deuses,  
de outro o ponto de vista humano, simplesmente humano.

*Oswaldo Porchat Pereira*

## RESUMO

PUIG, Carlos Fils. *James Clerk Maxwell e a unidade do mundo: modelos e metáforas na construção das teorias científicas*. 2014. 105 f. Dissertação (Mestrado em Filosofia) Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

Esta é uma pesquisa sobre o uso de metáforas na construção de modelos por parte do físico escocês James Clerk Maxwell. O objetivo da pesquisa foi buscar compreender de que maneira o uso de metáforas e modelos é legítimo na ciência e em que medida contribui para seu sucesso. Além disso, busca compreender em que medida o uso de artifícios como modelos e analogias entre ramos distintos da ciência são impulsionadores de sucesso explicativo e preditivo da teoria do físico estudado. Explora as crenças teológicas e filosóficas do autor, que vê o mundo como unidade, permitindo a analogia entre ramos distintos da física. Seus desenvolvimentos em torno de teorias como calor, cores, óptica, magnetismo e eletricidade permitem evidenciar essa visão em todo o seu trabalho. Maxwell é considerado inaugurador de nova metodologia com o uso de modelos e metáforas. Explora o desenvolvimento da teoria das cores, da descrição matemática da estabilidade dos anéis de Saturno e o desenvolvimento da teoria dos gases como preâmbulo à discussão da teoria do eletromagnetismo. Descreve o desenvolvimento teórico do eletromagnetismo em seus diversos momentos. A construção da teoria do eletromagnetismo evidencia paulatino abandono do mecanicismo, uso intenso de modelos e metáforas temporários e ênfase na quantificação e no uso de experimentos. Discute o relacionamento de Maxwell com as discussões filosóficas, sociais e teológicas de sua época, seu engajamento em atividades práticas nesse sentido e suas influências científicas e filosóficas. Descreve e discute os textos filosóficos do cientista, em que se evidenciam sua ontologia, suas crenças teológicas e sua concepção de analogias. Discute a questão do uso de analogias em ciência e compara diversos autores que abordam o tema. A metodologia utilizada foi a de levantamento bibliográfico com análise crítica da literatura do autor e de seus comentadores, além de comentário crítico sobre os textos primários e secundários. Conclui que o sucesso científico de Maxwell deve-se à sua aposta numa unidade do mundo garantida por Deus, bem como na unidade entre o mundo e a mente humana, posturas que mostraram ser bem-sucedidas quando aplicadas à metodologia científica. Conclui também pela legitimidade e necessidade do uso de metáforas e modelos no empreendimento científico.

Palavras-chave: Maxwell, James Clerk. Analogia e metáfora em ciência. Modelos. Compatibilidade entre ciência e religião. História da física. Eletromagnetismo. Século XIX.



## ABSTRACT

PUIG, Carlos Fils. *James Clerk Maxwell and the Unity of the World: models and metaphors in the constructions of scientific theories*. 2014. 105 f. Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

This is a research about the use of metaphors in the construction of models by the Scottish Physician James Clerk Maxwell. The aim of the research was to comprehend in which way the use of metaphors and models is legitimate in Science, and in what measure it contributes to its success. Also, tries to comprehend in which measure the use of artifices like models and analogies between different branches of Science forward the explicative and predictive success of the physician's theory that is studied here. It explores the theological and philosophical beliefs of the author, who sees the world as a unity, allowing for the analogy between distinct branches of Physics. His developments with theories like heat, colour, optics, magnetism, and electricity enable to highlight this vision in the whole of his work. Maxwell is considered the starter of a new methodology with the use of models and metaphors. It explores the development of the theory of colours, the mathematical description of the stability of the rings of Saturn, and the development of the theory of gases as an introduction to the discussion of the theory of electromagnetism. It describes the theoretical development of electromagnetism in its several different moments. The theoretical construction of electromagnetism highlights the gradual abandonment of mecanicism, the intense use of temporary models and metaphors, and the emphasis in the quantification and use of experiments. It discusses the relationship between Maxwell and the philosophical, social and theological discussions of his time, his engagement in practical activities in this sense, and his scientific and philosophical influences. It describes and discusses the philosophical texts of the scientist, in which his ontology, his theological beliefs, and his analogy conceptions are highlighted. It discusses the issue of the use of analogies in Science, comparing several authors who deal with the subject. The methodology used was that of bibliographic survey with critical analysis of the author's literature, and of his commentators, and also a critical commentary on the primary and secondary texts. It concludes that the scientific success of Maxwell is due to his wager on the unity of the world guaranteed by God, as well as the unity between the world and the human mind, positions that showed to be well-succeeded when applied to the scientific methodology. It concludes also for the legitimacy and necessity of the use of metaphors and models in the scientific enterprise.

Palavras-chave: Maxwell, James Clerk. Analogy and Metaphor in Science. Models. Science and Religion Compatibilism. History of Physics. Electromagnetism. 19<sup>th</sup> Century.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	O jovem Maxwell segurando seu <i>color top</i> .....	19
Figura 2	Primeira fotografia colorida produzida utilizando três exposições com ‘filtros’ diferentes para a produção das três cores básicas .....	23
Figura 3	Representação do triângulo de cores de Maxwell .....	23
Figura 4	Anéis de Saturno, fotografia feita pelo telescópio Cassini-Huygens .....	26
Figura 5	Linhas produzidas por limalha de ferro sobre um papel com um ímã permanente embaixo .....	37
Figura 6	O abraço mútuo entre eletricidade e magnetismo .....	39
Figura 7	Modelos mecânicos, relação perpendicular entre magnetismo e eletricidade e ondulações .....	48

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
1.	<b>UM OLHAR DIFERENTE</b> .....	15
1.1	<b>As cores</b> .....	15
1.2	<b>Os anéis de Saturno</b> .....	24
1.3	<b>Professor no Marischal College</b> .....	27
1.4	<b>Teoria Cinetica dos gases</b> .....	29
1.4.1	<u>O demônio de Maxwell</u> .....	33
1.4.2	<u>Os vórtices de Clausius</u> .....	34
2	<b>ELETROMAGNETISMO</b> .....	35
2.1	<b>As linhas de faraday</b> .....	36
2.2	<b>Linhas de força</b> .....	42
2.3	<b>Uma teoria dinâmica do eletromagnetismo</b> .....	50
2.4	<b>O tratado do eletromagnetismo</b> .....	52
2.5	<b>Éter, vortices, engranagens, roldanas e forças</b> .....	57
3	<b>O USO DE METÁFORAS NA CIÊNCIA</b> .....	61
3.1	<b>Deus e o mundo</b> .....	61
3.2	<b>Experimentos eletricos</b> .....	69
3.3	<b>A constituição do mundo: moléculas</b> .....	72
3.4	<b>Analogias reais</b> .....	83
4	<b>CONCLUSÃO</b> .....	99
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	101

## INTRODUÇÃO

Por toda sua vida, James Clerk Maxwell cultivou intensa religiosidade, principalmente após uma experiência mística de conversão religiosa. Sua crença, entretanto, não era conflitante com o empreendimento científico, pelo contrário, para ele, Deus havia dado ao ser humano a faculdade da razão e a possibilidade de exploração do mundo através do saber científico e, por isso, era vontade divina que desenvolvêssemos esse saber. Para os britânicos vitorianos, estudar, principalmente matérias abstratas, em especial a matemática, era considerado modo de elevar a alma e afastar-se da vida terrena. Mas para Maxwell, a natureza, criação divina, devia também ser objeto do estudo, também como forma de elevação espiritual. Deus criara o mundo de modo unificado e, embora não nos seja facultado conhecer o mundo tal como é, em sua natureza intrínseca, sua exploração nos aproxima de Deus e é possibilitada por essa unidade.

Percebe nas analogias, ou metáforas, meio de encontrar a conexão que há entre diferentes teorias físicas, bem como entre o intelecto e a própria natureza. Como parte da natureza, nossa mente é formada de modo necessariamente análogo ao modo de ser das coisas. Isso permite apostar numa relação direta entre as teorias científicas e o mundo, ainda que aquelas não possam descrever este completamente. Sim, a matemática servia para elevar a alma, mas não necessariamente distanciando-nos do mundo, que lá está para ser desvencilhado por esse mesmo raciocínio, através da quantificação de fenômenos, de sua descrição em termos de formas bem estruturadas, que possam ser trabalhadas com as ferramentas da geometria.

O mundo possui dimensões que não podem ser abarcadas por nossos sentidos. Existem fenômenos cujas partes e funcionamento nos escapa abarcar. Entretanto, utilizando o método científico e o raciocínio matemático, através da construção de modelos plausíveis, podem-se atingir esses domínios distantes. O tempo de Maxwell é tempo de grande ampliação de horizontes: evolucionismo de Darwin, magnetismo terrestre de Humbolt, fenômenos elétricos e magnéticos sendo explicados, máquinas a vapor produzindo em larga escala, comunicação à distância utilizando o telégrafo, avanços em todas as áreas do saber.

De fato, vive uma época de grandes reviravoltas: o ‘fundamento mecânico’ para toda a física, embora não possa ser tido como visão hegemônica em nenhuma época, começa a deixar de ser tomado como imprescindível. O uso do experimento controlado e quantificado passa a fazer parte crucial do empreendimento científico. Maxwell participa intensamente

dessas mudanças, sendo considerado iniciador de uma nova maneira de utilizar modelos em física e sendo responsável pelo desenho e construção do até hoje importantíssimo laboratório de Cambridge. Avanços tecnológicos trazem questões de resolução premente, como as máquinas industriais e o uso de eletricidade nas cidades e para a comunicação através do telégrafo. O estudo em universidades começa a deixar de ser, bem aos poucos, prerrogativa da nobresa, do clero e de famílias comerciantes abastadas. Maxwell participa plenamente dos processos de estabelecimento de padrões técnicos para a eletricidade e leciona em escolas noturnas para trabalhadores. Filho de seu tempo, pode-se dizer que todas essas mudanças importantes tiveram caracterização em sua história.

Nesta dissertação, exploraremos seu trabalho tendo esses fatos em perspectiva. James Clerk Maxwell é aclamado como um dos físicos mais importantes da história. Isso se deve às suas contribuições numerosas, profundas e revolucionárias para a ciência. Embora seja principalmente conhecido por sua teoria do eletromagnetismo, em que unifica eletricidade, magnetismo e óptica, o físico escocês desenvolveu trabalho teórico e experimental em todas as áreas da física de seu tempo, em geral, trabalhando simultaneamente com os campos mais diversos.

Não obstante o fato de que o resultado do trabalho de qualquer cientista em particular não pode ser encarado como sendo somente resultado de seu “gênio”, mas como produto de sua época, das interações com seus pares e das características institucionais que propiciaram ambiente fecundo para o desenvolvimento de sua ciência, a história de Maxwell faz surgir algumas questões cuja resposta talvez seja iluminadora para a compreensão do modo como a ciência é produzida. Maxwell utiliza modelos e metáforas de modo bastante amplo, fazendo analogias entre campos diversos da física, construindo esquemas pictóricos em que os elementos constituintes são somente construtos mentais. Ele parte de uma ontologia em que a garantia para a possibilidade do conhecimento é dada por Deus, utiliza a matemática levando-a ao limite e aproveitando-a de modo ao mesmo tempo inusitado e genial.

Maxwell parte de modelos matemáticos e pictóricos, faz analogias entre ramos diversos da física e não limita seu trabalho teórico aos consensos estabelecidos em seu tempo. Como explicar tamanho sucesso em produzir teoria científica capaz de dar conta de explicações e fazer previsões a partir de elementos que, a rigor, não seriam esperados na metodologia científica que, consensualmente, evitaria diversos desses elementos? Como explicar o tamanho sucesso em produzir uma teoria eletromagnética simples, com repercussões tão poderosas para a ciência e tecnologia, bem como para toda a história do mundo, a partir de modelos instrumentais, no mínimo, díspares em relação ao que hoje se

espera ser a realidade? Talvez não encontremos repostas a essas questões, mas o estudo da história de Maxwell certamente ilustra, de modo especial, como ocorre o empreendimento científico e talvez mostre que seu alcance e limitações estejam além da esfera das considerações metodológicas de uma análise interna das teorias científicas.

O que foi dito acima suscita ainda mais questões e deixa em aberto um sem número de possibilidades de investigação. Nosso propósito aqui, entretanto, é compreender a relação que o autor faz entre sua teoria científica e o mundo, bem como compreender quais são os elementos institucionais, comunitários, sociais e históricos que propiciaram o sucesso da física maxwelliana. Em particular, nos interessa a questão da criatividade e dos vínculos<sup>1</sup>, elementos cruciais para o empreendimento científico. Para isso, será necessário investigar o modo como o autor via o mundo e a natureza, suas concepções filosóficas e teológicas, metafísicas e metodológicas.

Como ponto de partida para a compreensão do uso de metáforas, utilizou-se como base teórica os trabalhos de Lakoff e Johnson (1980) e Hesse (1966; 1973). Para uma análise da obra e do contexto histórico em que o autor viveu, utilizou-se, principalmente, os trabalhos de Robert Kargon (1969), Peter Harman (1982; 1988; 1992; 1998), Stephen Brush (1974; 2001), Darrigol (1993a, 1993b, 2000) e Jordi Cat (2012), bem como os trabalhos de Chalmers (1986; 2001), D'Agostino (2002) e Lambert (2011). As biografias consultadas foram de uso mais corrente (EVERITT, 2007; CAMPBELL; GARNETT, 2010).

A metodologia empregada nesta pesquisa foi a de análise dos textos do autor, com levantamento bibliográfico de toda literatura publicada a respeito do mesmo desde meados do século XX, sendo selecionados os textos que nos pareceram pertinentes. Da bibliografia levantada, somente com relação a alguns poucos artigos, e um número um pouco maior de livros, aos quais não tivemos acesso. Para a literatura que tivemos a oportunidade de consultar, o critério de exclusão foi, basicamente, o conteúdo dos artigos e livros, sendo excluídos artigos ou livros de ordem técnica com relação às características internas da teoria física ou de seu desenvolvimento matemático. Após a leitura de todos os textos encontrados como relevantes, procedeu-se à análise crítica e comparativa desses.

A dissertação está dividida em três capítulos. No primeiro, é feita uma breve descrição dos trabalhos do autor em campos da física que não o eletromagnetismo, para poder dar conta da necessidade de uma visão geral da obra e, com isso, evitar perdas em sua compreensão (HARMAN, 1998, p. xi). Nesse capítulo, incluiu-se uma breve análise de seu contexto social

---

<sup>1</sup> O conceito de 'vínculo' é aqui usado no sentido do inglês 'constraint', que também poderia ser traduzido como 'parâmetro', 'padrão', 'limite', 'referencial' ou 'restrição'.

e histórico, como exemplo de corte transversal possível. Devido à escassez de espaço, essa análise não foi feita para toda sua biografia. O segundo capítulo trata da descrição do desenvolvimento por parte de Maxwell da teoria do eletromagnetismo. Essa descrição parece importante pelo fato de que é nesse desenvolvimento que se dá o uso de analogias e metáforas com mais profusão, além de haver carência de literatura publicada em língua portuguesa a respeito do autor. O terceiro capítulo faz uma análise da relação entre a física de Maxwell e sua filosofia, analisando os textos em que aborda questões ontológicas, teológicas e relacionadas ao método científico. Trata-se de três capítulos relacionados de modo um tanto quanto arbitrário, mas que, em seu conjunto, permitem uma visão global do trabalho do autor. Uma análise mais aprimorada pode ser feita a partir desta pesquisa.

## 1 UM OLHAR DIFERENTE

Seguindo o conselho de Peter Harman (1998, p. *xi*), de que não se deve estudar o autor sem ler todos os seus trabalhos científicos, em vez de ater-se somente àqueles relacionados ao eletromagnetismo, queremos fazer uma leitura ampla do autor. Este capítulo tem esse propósito, uma vez que a maior parte da pesquisa deu-se, de fato, em torno do desenvolvimento da teoria do eletromagnetismo. O relato dos desenvolvimentos teóricos de Maxwell, bem como a avaliação da formação de sua identidade religiosa e seu relacionamento com a sociedade da época, de sua vida acadêmica em escolas escocesas, seu envolvimento com as discussões religiosas e atuações políticas no seio de uma revolução industrial em pleno estabelecimento; todos são elementos que permitem compreender o caminho que delineia seu modo de fazer ciência. Dificilmente se poderá compreender, de modo fragmentado, um autor que unificou teorias científicas por ter uma visão unificada da natureza.

Assim, neste capítulo nos dedicamos ao estudo que Maxwell fez de outros ramos da física, como seu trabalho sobre a percepção das cores, suas discussões sobre teoria de gases e termodinâmica e seu trabalho sobre os anéis de Saturno, por exemplo. Optamos por não seguir ordem cronológica, mas seguir os temas ressaltados pelo próprio autor. Como Maxwell sempre trabalhou simultaneamente em diversos campos da física, as discussões se referem a períodos diversos, que serão, não obstante, sempre explicitados. Também optamos por não refazer a biografia do autor. Dados biográficos serão acrescentados à medida que surgir a necessidade. Embora boas biografias tenham sido produzidas, seu foco é na vida individual, e seria cansativo refazer esse trajeto em paráfrase. Quando houver necessidade, indicaremos onde encontrar dados biográficos aprofundados para a necessidade de aprofundamento.

### 1.1 As cores

No desenvolvimento da teoria das cores feito por Maxwell, o uso da matemática e das analogias ocorre de modo bastante particular. O tema das cores é interesse presente em toda a vida do físico e a relação entre a teoria e a epistemologia podem ser bem exemplificados neste



caso em que busca conciliar, por um lado, as teorias sobre cores que existem em sua época, e por outro, as observações feitas em experimentos usando instrumentos simples, de sua própria fabricação e engenho. Ao observar seu desenvolvimento do tema das cores, podemos perceber de modo claro como o autor se coloca diante da ontologia e da própria teoria da física, bem como o lugar que a metafísica tem na delimitação do problema.

O autor utilizava o ‘método da analogia’, ou o ‘método da modelagem’ (HON; GOLDSTEIN, 2012). Aqui, pretendemos mostrar que essa metodologia própria já pode ser observada mesmo em seus primeiros trabalhos. Além disso, podemos perceber que o modo como aborda a física já é, desde sempre, através de um olhar unificador. Sua ontologia e seu modo de abordar a ciência devem-se, também em parte, às crenças teológicas do autor, como também mostraremos adiante. Sua abordagem da teoria das cores mostra o uso do experimento e da quantificação como modos de estabelecer teoria física.

Muito provavelmente, esse trabalho sobre as cores reforçou a crença do autor quanto a uma analogia entre a percepção humana e o mundo: para ele, tanto a percepção humana, como o raciocínio, ou a razão, estão ligados ao mundo de modo analógico. Embora não tenhamos como perceber a natureza intrínseca das coisas do mundo, o modo como as percebemos possui uma analogia com sua natureza intrínseca e essa analogia permite o conhecimento. O uso da analogia e a “construção” de modelos são recursos que utilizou em todos os seus estudos; seja concretamente, seja como experimento mental, ou ainda através de esquemas desenhados, mas tomando o modelo como objeto do estudo e da experimentação, principalmente para a física cujos objetos não podem ser observados diretamente. Isso também pode ser constatado em sua juventude, em que permanentemente se dedicava a estudar e tentar resolver, além do exemplo da teoria das cores citado abaixo, problemas do eletromagnetismo e da teoria dos gases (HARMAN, 1998, pp. 14-26; REID, 2010).

Desde a infância, Maxwell demonstrou curiosidade e insatisfação para com as explicações relacionadas às cores. Ele pode ser descrito como tendo sido uma criança curiosa e voltada para a busca de compreensão do mundo, de tal modo que podia apresentar um comportamento “excêntrico”, ou diferente das outras crianças, a ponto de ganhar o apelido de “Dafty” (bobalhão, tolinho) (EVERITT, 2007; CAMPBELL; GARNETT, 2010). Entretanto, logo demonstrou que sua excentricidade era sinal de genialidade. Aos 14 anos ganha seu primeiro prêmio, a medalha Adams de matemática; e aos 15, em 1849, tem seu primeiro artigo sobre a produção de ovais em geometria publicado (MAXWELL, 1849), através de James Forbes, amigo de seu pai, que frequentava a Sociedade Científica de Edimburgh, Escócia. Dois anos depois, publica mais um artigo do mesmo modo, sobre outro tema da

geometria (HARMAN, 1998, pp. 18; MAXWELL, 1851). Esses dados são relevantes no sentido de que sua formação em matemática fornece o instrumental necessário para seu desenvolvimento da física nos diversos campos em que se sobressai. Maxwell é, sobretudo, um matemático de primeira categoria (HARMAN, 1998, p. 19).

Em 1848, aos dezessete anos, graças ao estímulo do pai, passa um tempo no laboratório óptico de William Nicol, onde aprende não só a tratar vidro de modo a preparar lentes e instrumentos ópticos, como “realiza experimentos sobre os efeitos cromáticos da luz polarizada em materiais de refração dupla, cristais e vidro mecanicamente deformado” (HARMAN, 1998, p. 16; LONGAIR, 2008). Utilizará essa habilidade na construção de instrumentos de laboratório ao longo de toda a sua vida; por exemplo, quando Maxwell utiliza experimentos didáticos em suas aulas como professor no Marishal College, e quando é encarregado do estabelecimento, planejamento e desenho do laboratório de Cambridge (HARMAN, 1998, pp. 16ss; LONGAIR, 2008).

Obstinado em compreender as cores, Maxwell realiza experimentos e cria instrumentos para isso. A partir dos dados que obtém, dá tratamento quantificado de modo a estabelecer uma teoria das cores. De fato, é a partir de seu trabalho que a teoria das cores fica estabelecida (LONGAIR, 2008). A insatisfação de Maxwell com as explicações para as cores não se deu somente na infância; as teorias de que dispunha ao iniciar seus estudos não eram consistentes. A abordagem aceita para a composição das cores era aquela apresentada por Newton e elaborada por Voltaire, que descrevia a decomposição da luz branca em sete tons quando passada por um prisma. A decomposição da luz, entretanto, não encontrava correspondência em relação ao conhecimento tácito apresentado pelos pintores, que descreviam as cores como podendo ser compostas a partir de três cores básicas, chamadas ‘primárias’ (LONGAIR, 2008). Maxwell subscrevia à óptica newtoniana, entretanto, mostra como a explicação para a mistura de pigmentos não pode ser a mesma que envolve a descrição da luz, uma vez que no primeiro caso trata-se de luz refletida em alguma superfície e, no segundo, da luz diretamente recebida (MAXWELL, 1856b; 1857; 1861a; 1871).

Embora Newton apresentasse modo de compor a luz colorida através de pares de cores básicas, dentre os sete tons básicos decompostos pelo prisma, os experimentos usados por Newton para demonstrar isso nunca puderam ser reproduzidos. A divisão em sete cores não era uma divisão claramente estabelecida parecendo, em última análise, uma divisão arbitrária. A teoria de Newton, apesar disso, tinha apelo devido a estar de acordo com a ideia de que as cores possuísem ‘harmonia’ entre si. Essa harmonia é análoga àquela percebida nas notas musicais (LONGAIR, 2008). Maxwell recorre à teoria de Young, que postula três cores

básicas para formar todas as outras (MAXWELL, 1856b; 1857; 1861a; 1871). Entretanto, a teoria de Young era somente qualitativa, carecia de quantificação. Além disso, necessitava de ajustes quanto à escolha das três cores primárias básicas; Young utilizara vermelho, amarelo e azul, como os pintores, mas Maxwell observou que, ainda que as cores pudessem ser escolhidas arbitrariamente para efeito de composição a partir de três básicas, essa escolha poderia ser feita de modo mais adequado à representação escolhendo-se o azul, o verde e o vermelho como cores básicas (LONGAIR, 2008).

Utilizando essa teoria, realiza experimentos em que constrói um pequeno aparelho, o '*colour top*' (superfície de cores), com o qual pode acoplar três círculos com as cores básicas, entrepassados através de corte em um raio, além de dois outros círculos internos, montados do mesmo modo, com as cores branco e preto (Figura 1). Ao girar o aparelho em alta velocidade, podia-se obter a cor resultante da mistura, bem como o grau de cinza equivalente no círculo interior, formado pelos círculos de papel branco e preto. Maxwell dividiu seu *colour top* em 100 partes, possibilitando tratar a composição das cores de modo quantificado. Sua teoria, então, postula que todas as cores podem ser formadas através de mistura das três cores básicas, somando-se a intensidade (quantificada a partir do cinza), expressas por meio de duas equações simples (HARMAN, 1998, pp. 37-38; LONGAIR, 2008).

Além do *colour top*, Maxwell cria outro instrumento para realizar experimentos: a caixa de cores. Trata-se de um aparelho constituído de uma caixa com uma abertura para entrada de luz solar, um prisma e alguns espelhos, além de outras aberturas para observação da luz decomposta pelo prisma. Esse aparelho permitiu que fizesse observações sobre como eram percebidas as cores formadas por raios de luz, em vez de cores pintadas numa superfície. Assim, reuniu mais dados para sua apresentação à Royal Society em 1871 (MAXWELL, 1871; DOUGAL; GREATER; MARSON, 2006).

Vale ressaltar, disso, os elementos que podem ser apontados como concernentes à metodologia experimental de Maxwell: vínculos (parâmetros) de observação quantificáveis que podem ser tratados matematicamente; tratamento matemático simples e elegante; reprodutibilidade; o uso de experimentos visando a corroboração da teoria e a exploração de hipóteses.

**Figura 1** – O jovem Maxwell segurando seu *color top*.



Fonte: Domínio público, fonte desconhecida, disponível em [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:J\\_C\\_Maxwell\\_with\\_top.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:J_C_Maxwell_with_top.jpg)  
Acesso em 22 jun. 2013.

Alguns dos experimentos realizados por Maxwell foram direcionados à percepção das cores por parte de diversos indivíduos. Ele mostra que a percepção das cores difere de indivíduo para indivíduo, sendo essa diferença muito pequena para a moda das pessoas, mas chegando a variar grandemente em alguns indivíduos. A questão da composição das cores, então, passa a ser uma questão mais relacionada à percepção das mesmas, do que à sua composição básica. As cores não seriam “formadas” por “cores básicas”: a luz se comporta de modo uniforme, independente da cor apresentada. Cada cor percebida corresponde à luz em determinado comprimento de onda, ou a feixes de ondas de diversos comprimentos (MAXWELL, 1861a; 1871). Para essas observações, Maxwell utilizou outro instrumento, do qual construiu diversas versões: sua caixa de feixes de luz, que constituía basicamente de uma

caixa de madeira com diversas aberturas, espelhos e um prisma. Projetando-se luz branca pela abertura principal, o prisma decompõe a luz, que é projetada para a outra extremidade, em que ranhuras correspondem às três cores básicas, posicionadas de acordo com o ângulo de refração de cada comprimento de onda correspondente às cores. Maxwell produziu diversas versões dessa caixa de luz, sendo a mais conhecida a versão de quase dois metros, com a qual trabalhava em seus aposentos no Marishal College. A conclusão de seus experimentos com observadores diversos para a cor decomposta nesse instrumento foi a de que havia, não na cor em si, mas em nosso aparelho de percepção de cores, ou seja, o olho humano, estruturas que permitiam a percepção da luz em determinado espectro (HARMAN, 1998; LONGAIR, 2008).

A óptica física não nos leva a uma teoria das três cores primárias, mas nos deixa de posse de um número infinito de raios puros com um número infinito mais infinito de feixes de luz compostos, cada um formado por alguma proporção de dado número de raios puros (MAXWELL, 1861a, p. 446)<sup>2</sup>.

Maxwell percebeu que a luz, ela mesma, não era composta por cores básicas, mas que nossa visão as percebia desse modo. A teoria da composição de cores, portanto, era muito mais uma teoria psicológica que física e era do âmbito de estudo da anatomia e fisiologia humana, mais do que poderia ser objeto da física. Isso é demonstrado através de experimentos com tratamento quantificado que permitem o tratamento matemático à teoria (MAXWELL, 1856b, 1857, 1861a, 1871). Ele investigou, por exemplo, a discrepância média entre observadores diversos, quanto à composição das cores. Observou que alguns indivíduos percebiam a luz branca como tendo um tom ‘róseo’. Atribuiu isso ao ‘ponto amarelo’ que a maioria das pessoas teria em seus olhos, e alguns não teriam. Esse ponto amarelo serviria para compensar a composição das cores na percepção do ‘verde-azulado’ (MAXWELL, 1871, p. 278-9).

Além disso, fez experimentos com daltônicos. A descrição do daltonismo havia sido feita recentemente (década de 1830) pelo celebrado químico Dalton. Segundo Dalton, a percepção de cores se dava de algum modo através de estruturas que se pode observar no fundo do olho humano, formadas por cones e bastonetes. Como Dalton, Maxwell atribui à percepção de cada uma das cores básicas a uma dessas estruturas. Os daltônicos são pessoas que não têm uma dessas estruturas funcional, perdendo a percepção para as cores vermelhas (MAXWELL, 1871, p. 277; HARMAN, 1998, pp. 39-46).

---

<sup>2</sup> Physical optics does not lead us to any theory of three primary colours, but leaves us in possession of an infinite number of pure rays with an infinitely more infinite number of compound beams of light, each containing any proportions of any number of pure rays (MAXWELL, 1861, p. 446).

Maxwell conclui que

Temos, no olho, por um lado a luz caindo sobre essa estrutura maravilhosa, e por outro lado a sensação da visão. Não podemos comparar essas duas coisas; elas pertencem a categorias diferentes. *Toda a metafísica está lá como um grande hiato entre elas.* É possível que possam ser feitas descobertas em fisiologia traçando-se o curso das perturbações nervosas “através das finas fibras até o cérebro consciente”, mas isso não nos tornaria mais sábios do que somos com respeito às sensações de cores que só conhecemos por as sentirmos nós mesmos. Ainda assim, embora seja impossível conhecer uma sensação pelo estudo anatômico de um órgão com o qual está ligada, podemos usar a sensação como meio de investigação da estrutura anatômica (MAXWELL, 1871, p. 276, grifo nosso)<sup>3</sup>.

Esse trabalho sobre as cores fugia ao domínio da física e, muito embora seja um dos menos ressaltados como contribuição do autor, notadamente entusiasmaram muito o físico, que utilizou seu treinamento para a produção de instrumentos ópticos, realizou demonstrações coloridas em suas palestras (MAXWELL, 1856b; 1857; 1861a; 1871) e foi responsável por fazer a primeira fotografia colorida (Figura 2), uma composição de três fotografias tomadas com ‘filtros’ das cores básicas que, sobrepostas, produziram uma imagem colorida. Essa imagem não ficou ao gosto de Maxwell, que atribui aos materiais da época o resultado não tão exato (MAXWELL, 1861a).

Para representar graficamente a distribuição de tons de cores, Maxwell recorre à analogia para descrição de sua variação num espaço em gráfico tridimensional tomando cada uma das cores básicas, determinadas arbitrariamente, como um dos eixos. Essa representação é transpassada para o plano num gráfico bidimensional em forma de triângulo (Figura 3) (MAXWELL, 1856b; 1861a). Esse tratamento geométrico permite analisar matematicamente a composição das cores. Quando observamos que isso é feito entre 1855 e 1865, vemos o uso da analogia já em seus primeiros trabalhos. Além disso, parece claro que o uso da analogia, ao menos no tratamento matemático, era corrente e bem aceito, embora tenha sido desenvolvida de modo particular por Maxwell: analogia matemática e analogia com outros campos da ciência, tratamento matemático graças à quantificação de fenômenos, recurso à experimentação como fonte de corroboração e correção à teoria, bem como o uso da

---

<sup>3</sup> In the eye we have on the one hand light falling on this wonderful structure, and on the other hand we have the sensation of sight. We cannot compare these two things; they belong to opposite categories. The whole of Metaphysics lies like a great gulf between them. It is possible that discoveries in physiology may be made by tracing the course of the nervous disturbance “Up the fine fibres to the sentient brain;” but this would make us no wiser than we are about those colour-sensations which we can only know by feeling them ourselves. Still, though it is impossible to become acquainted with a sensation by the anatomical study of the organ with which it is connected, we may make use of the sensation as a means of investigating the anatomical structure (MAXWELL, 1871, p. 276).

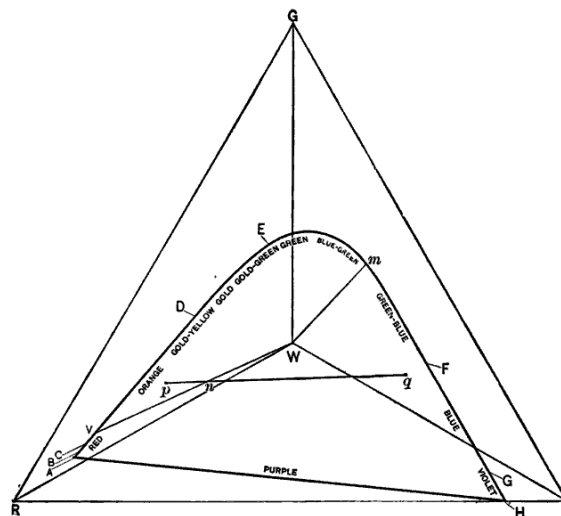
experimentação como recurso propedêutico, aceitação do ‘inexplicado’ não como mistério inalcançável, mas como desafio natural, cuja busca de resolução está dentro do escopo da ciência e do caminho ‘espiritual’ do ser humano (HARMAN, 1998, pp. 39-46; LAMBERT, 2008; STANLEY, 2012).

**Figura 2** – Primeira fotografia colorida produzida utilizando três exposições com ‘filtros’ diferentes para a produção das três cores básicas.



Domínio público, disponível em <http://www.pbase.com/rcicala/image/130699327>. Acessado em junho de 2013.

**Figura 3** – Representação do triângulo de cores de Maxwell.



Fonte: Domínio público. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fick\\_color\\_triangle.png?uselang=pt-br](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fick_color_triangle.png?uselang=pt-br). Acesso em: 22 jun. 2013.

## 1.2 Os anéis de saturno

Segundo Elizabeth Garber (2008), o desenvolvimento das técnicas e habilidades matemáticas em Cambridge é importantíssimo para a história da ciência no Reino Unido no século XIX. Entretanto, é pequena a ênfase dada a esse fato já que, segundo Garber (2008), poucas foram publicações feitas a partir de Cambridge naquela época; eram restritas à forma das questões do exame Tripos, ou do prêmio Smith. O exame Tripos é um exemplo da importância dada ao estudo da matemática na Cambridge vitoriana (LAMBERT, 2011). Era o modo de classificar os graduandos da faculdade e o êxito nesse exame dependia da preparação dada pelos professores a seus alunos, num trabalho feito individualmente na forma de tutoria, feita de modo privado, várias horas por dia, diariamente (GARBER, 2008). O exame era realizado em oito dias de provas e havia duas categorias: os que “passavam”, e somente faziam três dias de exames; e os que “passavam com honras”, realizando mais cinco dias de provas com questões de matemática aplicada de dificuldade crescente, totalizando oito dias de exames (HARMAN, 1998, pp. 19-23; GARBER, 2008). Além desses exames, havia o prêmio Smith, conferido aos que respondessem a uma questão atual da ciência que deveria ser resolvida usando a matemática aplicada, proposta aos que tivessem se destacado com honras no Tripos, uma forma, criada por Robert Smith (1689-1768), de demonstrar que sua excelência não vinha dos favoritismos dos professores, uma vez que eram os próprios tutores os responsáveis pela avaliação (GARBER, 2008).

Maxwell obteve segundo lugar no exame Tripos e a questão proposta para o prêmio Smith de seu ano era, grosso modo, como explicar a estabilidade dos anéis de Saturno. O aluno deveria examinar as três hipóteses para a composição dos anéis, se um sólido maciço, um fluido gasoso ou líquido, ou ainda se eram constituídos por um conjunto de aerólitos (sólidos de formas diversas suspensos em órbita). A investigação ocorreria ao longo de dois anos, em que Maxwell dedicou-se a estudar e responder à questão, vencendo o prêmio Smith em primeiro lugar, quando já era professor no Marischall College.

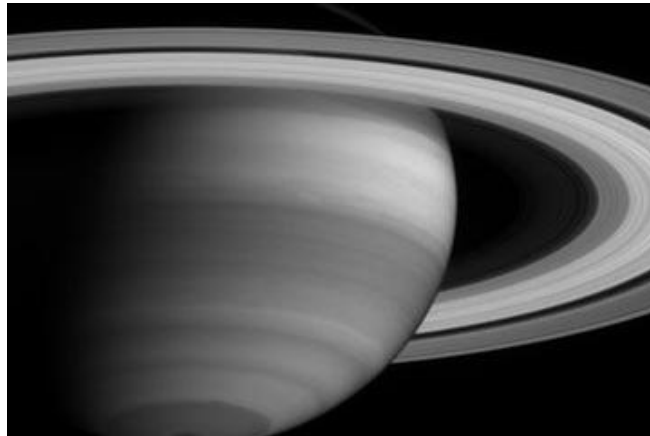
Embora tenha sido observado, 50 anos após a sua morte, que a composição dos anéis é de fato um conjunto de sólidos, a questão da demonstração de sua estabilidade é um problema que ainda está em aberto nos dias de hoje (OLGIVIE, 2008). Maxwell utiliza a descrição feita por Laplace para demonstrar como, caso os anéis fossem um sólido maciço, sua massa, ou densidade, teria que variar na ordem de  $41/2$  ao longo do anel: essa diferença seria facilmente



observada, caso fosse real. Descartada essa hipótese, parte para a possibilidade de que os anéis fossem um fluido líquido ou gasoso e, utilizando a dinâmica dos fluidos, que havia sido recentemente desenvolvida por Helmholtz e Clausius, mostra como também essa opção não possibilitaria a estabilidade do sistema (OLGIVIE, 2008; GARBER, 2008).

Resta a opção de que os anéis fossem constituídos por uma nuvem de objetos sólidos, desiguais entre si, em número grande o bastante para impossibilitar sua consideração um a um. Maxwell observa que a estabilidade dos anéis dependeria de alguns parâmetros: primeiro, a velocidade angular em órbita teria que variar dependendo da distância entre os objetos e o planeta; segundo, haveria que dar conta dos eventuais choques entre aerólitos. O problema que tem diante de si não pode ser resolvido através da mecânica clássica. Recorre, então, ao seu estudo da teoria dos gases de Clausius, considerando um valor médio para o tamanho das partículas, calculando seu movimento sem tomar cada partícula individualmente, mas tomando-as em conjunto, de modo análogo ao comportamento das partículas modelares para gases, já que não haveria como calcular sua trajetória individual. A partir desses cálculos, se dá conta de que essas partículas, no caso dos anéis de Saturno, não poderiam ser sólidos elásticos, mas necessariamente seriam sólidos inelásticos, se não completamente, em grande medida. Suas colisões não perturbariam, assim, de modo significativo, a estabilidade dos anéis. Seus cálculos previam, também, que haveria ondas de movimento se propagando ao longo dos anéis, ou seja, haveria movimento relativo das partículas em relação ao eixo de órbita, propagando-se pelos anéis em períodos ondulatórios definidos. Além disso, as velocidades médias para os aerólitos de cada anel corresponderiam a camadas intercaladas por espaços vazios, períodos que correspondiam a certas distâncias em que a estabilidade não era mantida (OLGIVIE, 2008; GARBER, 2008).

**Figura 4** – Anéis de Saturno, fotografia feita pelo telescópio Cassini-Huygens, NASA, 2006.



Fonte: Domínio público conforme outorgado por NASA.  
Disponível em:  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Saturn\\_Rings.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Saturn_Rings.jpg).  
Acessado em junho de 2013.

Assim, os anéis seriam descontinuados, sendo os aerólitos daquele trecho absorvidos pelos anéis imediatamente contingentes – os “vazios” entre os anéis já eram observados em seu tempo (OLGIVIE, 2008; GARBER, 2008). Esses interstícios entre os anéis também se explicam, hoje, devido à ação da força gravitacional das luas do planeta, nos pontos em que sua órbita cruza a dos anéis (OLGIVIE, 2008). A Figura 4 mostra uma imagem atual que coincide com a representação feita por Maxwell para demonstrar sua solução para o problema.

Embora seja surpreendente o fato de que posteriormente observa-se que os anéis são, de fato, constituídos de objetos de gelo, com densidade muito baixa, o que os torna praticamente inelásticos, propiciando as condições previstas por Maxwell usando somente cálculos matemáticos, talvez esse não seja o aspecto mais surpreendente desse episódio, pelo menos não do ponto de vista da história das ideias. Parece-nos ainda mais surpreendente a facilidade com que o filósofo natural pôde “violiar” a física newtoniana, deixar de lado seus parâmetros determinísticos, ainda que aderindo à mecânica clássica como paradigma para toda sua ciência, e abraçar o uso da mecânica estatística que estava começando a ser desenvolvida para a teoria dos gases por seus contemporâneos Helmholtz e Clausius.

Ainda hoje, parece contra intuitivo, diante da mecânica clássica, a introdução de modelos não determinísticos para a dinâmica de objetos macroscópicos, mesmo que aceitemos sua utilidade instrumental para o estudo de objetos microscópicos, como é o caso do conjunto de partículas que formam os gases. Maxwell confia em sua matemática e confia

na sua intuição, na analogia existente na natureza e na analogia entre o pensamento abstrato e a constituição do mundo, confia na unidade dessa constituição do mundo. Essa confiança pode ser explicada observando sua teologia que determina, em grande medida, o modo como estabelece sua ontologia, como veremos adiante. Como mostram Brush (1974), D'Agostino (2000), Bezerra (2006; 2011) e Videira (2011), entre outros, a mecânica clássica, embora servisse de parâmetro geral para o empreendimento científico, estava longe de ser um conjunto de princípios básicos, num bloco monolítico e incontestável. Havia intensa discussão sobre seus constituintes básicos, principalmente quanto ao conceito de “força” que, em Newton, ocorre “à distância” em sem explicação para essa ocorrência e sem explicitação do sentido desse conceito. Maxwell coloca-se ao lado daqueles que rejeitam a ideia de ação à distância e buscam explicar todos os fenômenos através de contato ou choque entre os objetos envolvidos nos fenômenos a serem explicados (BEZERRA, 2006). Assim, muito embora a mecânica fosse o principal parâmetro para o desenvolvimento da física, a sua compreensão era algo longe de ser hegemônico ou consensual.

### **1.3 Professor no marischal college**

Entre 1856 e 1860, Maxwell lecionou na universidade Marischal College, em Aberdeen, Escócia. Existindo há mais de 250 anos, Marischall era uma faculdade com cerca de 200 alunos, que formava filhos de profissionais liberais e comerciantes, bem como de membros de famílias abastadas da Escócia, e estava em vias de fusão com a Universidade de Aberdeen. Jovem entre a equipe de professores mais velhos, Reid afirma que, embora Marischal “não propiciasse a vida intelectual equivalente [à universidade de Aberdeen] (poucos lugares poderiam!)” (REID, 2008), encontra um ambiente que considera ideal: possui liberdade para lecionar o que quisesse, tempo e recursos para experimentar e explorar o que desejasse e proximidade à família (EVERITT, 2007; CAMPBELL; GARNETT, 2010).

Um longo interstício escolar permitia que fosse à propriedade da família, da qual passa a ser o administrador com a morte de seu pai em 1856, dedicar-se aos seus estudos e pesquisas. Considerado pelos alunos e professores como bom professor, alegre e bem humorado, dedicado à tarefa de lecionar, embora fosse pouco conversador e tivesse dificuldades em seus esforços de socializar-se com colegas e alunos. Os principais fatores propícios ao seu desenvolvimento como pesquisador eram “a necessidade de ‘disciplina’ e

‘liberdade’, características dele” (REID, 2008). Note-se que a faculdade, guardadas as proporções, parecia ter sido local em que havia oportunidade de educação formal para pessoas oriundas de diversos estratos socioeconômicos. É também nesse período em que se dedica a lecionar para trabalhadores, em uma “*evening class*” (curso noturno) (THEERMAN, 1986; MORUS, 1993; REID, 2008).

As disciplinas estudadas em Marischal eram bastante exigentes dos alunos, poucos dos quais seguiriam carreira em ciência, pois eram futuros advogados, religiosos, servidores civis, cirurgiões e comerciantes, além do que, não possuíam conhecimento prévio em física. A partir de seus cursos, publica diversos manuais de estudo, como sobre mecânica, hidrostática, óptica e astronomia. Embora viesse de uma cultura que privilegiava o pensamento abstrato, em sua formação em Cambridge, já em sua atuação como professor em Marischal percebe-se sua predileção pelo uso dos experimentos em laboratório, pois realiza experimentos, tanto demonstrativos, quanto exploratórios, com seus alunos (REID, 2008).

Não obstante, é período profícuo de produção intelectual, em que

escreveu oito artigos enquanto estava no Marischal College, [ ] produzindo 150 publicações de física de ponta, enquanto simultaneamente preparava e produzia 15 horas de palestras por semana, ao longo de cinco meses, aulas avançadas como voluntário por mais algumas horas por semana, realizando trabalhos práticos com alunos, entretendo-os, participando na vida da faculdade, mantendo extensa correspondência com amigos, colegas e parentes, fazendo amplas leituras e dando aulas noturnas como voluntário, numa produtividade de fato impressionante que faria inveja a qualquer professor de física britânico de hoje<sup>4</sup> (REID, 2008).

Também é nesse período que se dedica a produzir o trabalho sobre os anéis de Saturno e quando realiza a maior parte de seu trabalho teórico e experimental sobre a teoria da percepção das cores. Além disso, é enquanto está em Marischal que lança os fundamentos para a teoria cinética dos gases, “uma das principais realizações de sua vida” (REID, 2008), bem como realiza toda pesquisa que culminará, logo após sua saída de Marischal, como a publicação de *On Faraday’s lines of force* (MAXWELL, 1855b), iniciando o estabelecimento de sua teoria do eletromagnetismo (HARMAN, 1998; REID, 2008).

---

<sup>4</sup> “Wrote eight papers while at Marischal College, [ ] producing 150 published of cutting-edge physics while simultaneously preparing and delivering 15 hours of lectures a week for five months, a voluntary advanced class for several further hours per week undertaking practical work with students, entertaining them, participating in college life, keeping up an extensive correspondence with friends, colleagues and relatives, reading widely and volunteering to give evening classes is a truly impressive productivity that would be the envy of any physics professor in Britain today” (REID, 2008).

## 1.4 Teoria cinética dos gases

A teoria cinética dos gases está em pleno desenvolvimento durante o período em que Maxwell desenvolve seu trabalho científico, e só vai ser complementada após sua morte. Segundo Brush (1974) e Harman (1998), entre outros, sua contribuição para essa teoria, na forma do tratamento matemático dado à distribuição das velocidades das partículas de um gás, foi determinante e crucial.

Além de ter sido aluno de Thomson (Kelvin)<sup>5</sup>, ele também teve, junto com Thomson, William Hopkins como tutor. “Hopkins estava muito envolvido nas discussões geológicas dos anos 1840 e seguia a tendência de depreciar a importância do calor interno da Terra para explicação da maioria dos fenômenos geológicos”<sup>6</sup> (BRUSH, 1974). Essas discussões datavam de mais de cem anos na época e diziam respeito à questão de se o calor do interior dos corpos celestes teria um papel no sistema geral de movimento desses corpos, bem como das alterações na crosta terrestre. Além disso, a observação de que havia calor intenso no interior do planeta significava que ele estava esfriando com o tempo. Em geral, a maior parte dos filósofos naturais dos séculos XVIII e XIX considerava que os corpos celestes, incluindo a Terra, tinham um calor inicial e que estavam esfriando ao longo do tempo, numa escala de grandeza elevada (BRUSH, 1974).

De modo simples, a importância dessas discussões era, na época de Maxwell, principalmente com relação a um tema bastante pragmático; a perda energética da máquina a vapor. Como a condução de calor era percebida sempre dos corpos mais quentes para os menos quentes, esses estudos mostravam que, primeiro, não havia máquina que pudesse ser 100% eficiente, havendo sempre perda na transformação de energia calorífica para energia cinética e, segundo, parecia haver, diante desse problema, um problema maior, o da irreversibilidade dessa ocorrência ao longo do tempo.

A introdução de métodos estatísticos na teoria cinética do século XIX é, frequentemente, vista sobre o fundo de um ponto de vista ortodoxo supostamente prevalecente no século XVIII. Esse ponto de vista pode ser caracterizado como filosofia mecânica NEWTONIANA, ou a imagem do "universo como um *relógio*",

<sup>5</sup> Costuma-se fazer referência a Thomson, que posteriormente recebe o título de Lorde Kelvin, por seu sobrenome natal colocando-se entre parêntesis a alcunha nobre recebida com o título. Para simplificação, utilizaremos nesta, a partir deste ponto, somente ‘Thomson’, ficando implícito tratar-se do físico ‘Kelvin’.

<sup>6</sup> “HOPKINS was very much involved in these geological discussions of the 1840’s and went along with the tendency to depreciate the importance of the earth’s internal heat in accounting for most geological phenomena” (BRUSH, 1974).

na qual todos os movimentos são, em princípio, determinados através da especificação dada a eles de um tempo inicial, e em que todas as mudanças são cíclicas; portanto, a aleatoriedade e a irreversibilidade estão, ambas, completamente ausentes do corpo principal das leis físicas aceitas. Infelizmente para as descrições convencionais, as coisas não são tão simples: primeiro, porque NEWTON mesmo rejeitara com bastante firmeza essa visão; segundo, porque as especulações geofísicas já haviam introduzido a noção de fluxo irreversível de calor ao final do século XVII; e, terceiro, porque as considerações estatísticas não estavam, de forma alguma, excluídas das teorias dos fenômenos naturais em 1800. Portanto, as afirmações de determinismo e de estabilidade cíclica nos escritos de LAPLACE e seus colegas, no início do século XIX, não devem ser lidas como expressões de uma visão de mundo monolítica que tivesse sido aceita em todas as áreas da ciência, mas, em vez disso, como descrições admitidamente hipotéticas de um mundo ideal, de valor estritamente limitado para lidar com o mundo real. O universo como um relógio dos filósofos mecânicos do século XVII, como DESCARTES e BOYLE era profundamente repugnante para NEWTON por razões teológicas e, além disso, parecia a ele como inconsistente com certos fatos óbvios a respeito do mundo físico (BRUSH, 1974, grifos no original)<sup>7</sup>

Como para as leis da termodinâmica, em especial a Segunda Lei da Termodinâmica<sup>8</sup>, o debate, iniciado no século XVII e que aparentemente persiste até hoje, é em torno de se as leis da física devem aceitar a aleatoriedade, ou se a introdução da matemática estatística diz respeito a movimentos determinísticos, mas cujas condições nos são desconhecidas e, por isso, aparentam aleatoriedade, mas que de fato, não existiria. Em suma, um debate entre a visão de que o mundo seria determinístico, ou seja, governado por leis causais determinísticas, ou se seria governado por leis causais *não* determinísticas como, afirma Harman (1998)<sup>9</sup>, seria a aceção de Maxwell. Em artigo anterior, Harman (1988) ressalta a importância do debate em torno da questão nos séculos XVIII e XIX: os grandes avanços da

---

<sup>7</sup> The introduction of statistical methods in 19th-century kinetic theory is often seen against the background of an orthodox viewpoint supposedly prevailing in the 18<sup>th</sup> century. This viewpoint could be characterized as the NEWTONIAN mechanical philosophy or "clockwork universe" picture, in which all motions are in principle determined by specifying them at some initial time, and all changes are cyclic; thus randomness and irreversibility are both completely absent from the main body of accepted physical laws. Unfortunately for the conventional accounts, things are not quite so simple: first because NEWTON himself had quite firmly rejected this view, second because geophysical speculations had already introduced the notion of irreversible heat flow by the end of the 18<sup>th</sup> century, and third because statistical considerations were by no means excluded from theories of natural phenomena in 1800. Thus the assertions of determinism and cyclic stability found in the writings of LAPLACE and his colleagues at the beginning of the 19<sup>th</sup> century must not be read as expressions of a monolithic world-view that had been accepted in all areas of science, but rather as admittedly hypothetical descriptions of an ideal world, of strictly limited value in dealing with the real world. The clockwork universe of the 17<sup>th</sup> century mechanical philosophers such as DESCARTES and BOYLE was deeply repugnant to NEWTON on theological grounds, and moreover seemed to him inconsistent with certain obvious facts about the physical world (BRUSH, 1974).

<sup>8</sup> A segunda lei da termodinâmica determina que "A quantidade de entropia de qualquer sistema isolado termodinamicamente tende a incrementar-se com o tempo, até alcançar um valor máximo". Pode-se entender "entropia" como "quantidade de desordem" e mede, em termodinâmica, o grau de irreversibilidade de um sistema.

<sup>9</sup> "He drew the implication that while the universe was regulated by causal dynamical laws, these laws were not wholly deterministic." (HARMAN, 1988, p. 10).

física nesse período mostram como dificilmente se pode caracterizar a física do período como “newtoniana”. Isso se deve, segundo Harman (1988), ao fato de que o tratamento matemático dado pelos físicos britânicos, em especial Maxwell e Thomson, possibilita avanços em áreas da física, como o eletromagnetismo e a termodinâmica, que não se limitam ao tratamento puramente mecanicista. Ao mesmo tempo buscando explicações físicas do mundo que são ‘dinâmicas’, ou seja, partindo da premissa que todo fenômeno físico consiste de corpos em movimento, devido à separação entre os modelos matemáticos e os modelos ontológicos, a física avança com teorias que possuem elementos distintos da visão puramente mecânica, ou ‘newtoniana’ (HARMAN, 1988).

Entretanto, para Brush (1974), embora Maxwell tenha de fato questionado a capacidade do modelo mecanicista em geral em seus primeiros trabalhos sobre a teoria cinética dos gases, isso não foi o caso em seus trabalhos posteriores, alinhando-se ao grupo que defendia um mundo determinístico. Isto é curioso, ainda segundo Brush (1974), uma vez que seria graças às contribuições matemáticas à teoria feitas por Maxwell que, posteriormente, Boltzman desenvolveria a termodinâmica de modo que a irreversibilidade e a aleatoriedade seriam fatores integrantes da teoria (BRUSH, 1974). Vive, ao longo de sua vida, um “processo de transição entre uma física mecanicista e uma física desmecanizada” do qual é personagem central (BEZERRA, 2006). A introdução do conceito de ‘campo’ foi crucial para essa transição:

No processo de transição entre os dois enfoques, merecem destaque os seguintes aspectos: a renovação na ontologia das teorias físicas, com a inclusão do conceito de campo; a ampla aplicabilidade do formalismo lagrangiano; e o insucesso na busca de mecanismos subjacentes para explicar as interações (BEZERRA, 2006).

Outro fato curioso parece ser o de que os motivos que levavam Newton a repudiar o *determinismo* seriam os mesmos de Clausius e Maxwell para repudiar o *indeterminismo*: razões teológicas. Se para Newton um mundo que funcionasse tão perfeitamente que não necessitasse intervenção externa seria uma monstruosidade teológica, uma vez que dispensaria agência divina, para esses físicos do século XIX, a ordem universal seria necessariamente uma marca do plano divino para a natureza. Entretanto, como veremos adiante, apesar de ser pioneiro na introdução da matemática estatística na ciência e ser pioneiro na descrição dos processos irreversíveis da termodinâmica, mantém uma postura comedida quanto a afirmar o indeterminismo, diferenciando processos complexos, que

exigem tratamento estatístico, de alguma afirmação de que houvesse, na natureza, de fato processos estocásticos.

Clausius desenvolveu a teoria cinética dos gases partindo de um modelo em que o calor é o movimento das partículas mínimas da matéria, sua vibração, reavivando a teorização de um modo estritamente mecanicista. Seu diálogo com Clausius foi profícuo e os dois físicos contribuíram profundamente para o avanço teórico no campo da termodinâmica. Ambos partem de uma descrição estritamente mecanicista dos fenômenos que envolvem as variações de temperatura e pressão em dado volume de gás. Isso é expresso no artigo de Maxwell de 1860:

Tantas propriedades da matéria, especialmente quando na forma gasosa, podem ser deduzidas da hipótese de que suas partes diminutas estão em movimento rápido, sua velocidade aumentando com a temperatura, que a natureza precisa desse movimento se torna objeto de curiosidade racional. Daniel Bemouilli, Herapath, Joule, Krönig, Clausius, etc, mostraram que as relações entre pressão, temperatura e densidade em um gás perfeito podem ser explicadas supondo-se que as partículas se movam com velocidade uniforme em linhas retas, chocando-se contra os lados do vaso continente e, assim, produzindo pressão<sup>10</sup> (MAXWELL, 1860a, p. 377).

Como aponta Krüger (1987), Maxwell, o fundador da física estatística, não está preocupado em descrever “as coisas como realmente são”, mas em construir modelos que possibilitam o tratamento matemático da teoria. Sua aposta está em que existe uma relação análogica entre o pensamento, e portanto, o raciocínio matemático, e o mundo (KRÜGER, 1987). Embora o trabalho de Maxwell com relação ao calor e os gases não tenha sido definitivo, as implicações filosóficas desse trabalho são surpreendentes, que serão tratadas mais adiante.

Há dois aspectos importantes a serem ressaltados com respeito ao trabalho relativo à teoria cinética dos gases; o chamado “demônio de Maxwell” e o modelo de vórtices aplicado por Clausius e retomado por Maxwell. O primeiro por ser tema de infindáveis discussões e o segundo por ter implicações importantes para o trabalho do físico em eletromagnetismo.

---

<sup>10</sup> “So many of the properties of matter, especially when in the gaseous form, can be deduced from the hypothesis that their minute parts are in rapid motion, the velocity increasing with the temperature, that the precise nature of this motion becomes a subject of rational curiosity. Daniel Bemouilli, Herapath, Joule, Kronig, Clausius, &c. have shewn that the relations between pressure, temperature, and density in a perfect gas can be explained by supposing the particles to move with uniform velocity in straight lines, striking against the sides of the containing vessel and thus producing pressure” (MAXWELL, 1860a, p.377).



### 1.4.1 O demônio de Maxwell

Ao apreciar a dinâmica de gases num modelo de esferas perfeitamente elásticas, Maxwell propôs um exercício mental, ou suposição propedêutica. Nunca tendo chamado seu suposto ser poderoso e minúsculo de “demônio”, Maxwell propõe a seguinte conjectura. Supondo dois recipientes contendo um gás em temperaturas diferentes em cada um, e sendo os dois interligados por uma conexão que permite passar uma molécula do gás por vez, imaginamos um ser que teria a capacidade de perceber a energia cinética de cada partícula e de deixar passar as moléculas segundo sua vontade. Dado que a temperatura de cada porção de gás seria uma média das velocidades das moléculas desse gás e, portanto, havendo no interior do gás tanto moléculas com energia cinética alta, quanto baixa, o ser imaginado por Maxwell poderia deixar passar do gás com temperatura menor, somente as moléculas com grande energia cinética para o recipiente do gás com temperatura maior. Isso produziria um aumento de calor no gás com temperatura maior – haveria uma passagem de calor do gás mais frio para o mais quente. Esse seria um exemplo em que a segunda lei da termodinâmica estaria sendo violado, pois ela rege que o calor sempre vai do mais quente para o mais frio, numa “tendência” universal ao “esfriamento” da matéria (BRUSH, 1974; HARMAN, 1998).

O experimento mental chamado de “demônio de Maxwell” é discutido até os dias de hoje, mas parece ser consenso que Maxwell não teria dado conta da energia que esse ser extremamente potente, além de minúsculo e inteligente, gastaria ao fazer sua “trapaça entrópica”. Essa energia gasta conformaria o experimento imaginado às leis da termodinâmica e não seria um exemplo de sua violação. Maxwell propõe um experimento mental como exemplo de instância em que as leis da termodinâmica seriam inválidas, ou melhor, em que teriam somente “certeza estatística” (*statistical certainty*), valeriam ao tomarmos “números muito grandes de moléculas com as quais não podemos lidar individualmente” (BRUSH, 1974). Em outras palavras, a lei valeria de modo geral para tomarmos conjuntos de moléculas, como os gases, mas como não podemos tratar de cada molécula individualmente, e estas poderiam comportar-se de modo excepcional com relação à regra geral, a lei não teria validade absoluta, sendo apenas uma afirmação estatística. Para Brush (1974), a proposta de experimento mental de Maxwell, em vez de enfraquecer a afirmação de irreversibilidade do processo termodinâmico, o fortalece, pois demonstra como é a mistura de inúmeras trajetórias de moléculas em choque entre si que formam o conjunto dinâmico do gás. Maxwell afirma que a segunda lei da termodinâmica não se trata de um ‘teorema dinâmico’, mas é uma

‘expressão estatística’; enquanto as leis da dinâmica são reversíveis no tempo, as leis da termodinâmica são direcionais, ou seja, irreversíveis – ele se esforçará a esclarecer isso nos últimos anos de sua vida (HARMAN, 1998, p. 8).

Brush (1974) e Harman (1988, 1998, pp. 8ss), mostram como o autor manteria uma postura favorável ao determinismo, diferenciando uma abordagem estatística, daquela em que se considerasse que os fenômenos, de fato, seriam estocásticos. Embora pareça que o físico escocês abrace o debate buscando convencer-se de uma ou outra posição, Maxwell termina por diferenciar um processo que pode ser compreendido somente com o uso da estatística, daquele em que os fenômenos do mundo seriam, de fato, estocásticos, ou seja, aleatórios em si. Nada disso, entretanto, diminui a importância do ousado pioneirismo de Maxwell em introduzir a estatística no estudo da ciência natural.

#### 1.4.2 Os vórtices de Clausius

Em seu modelo para os gases, Clausius propõe um modelo atômico em que os átomos não seriam esferas ou sólidos de qualquer ordem, mas seriam vórtices no éter, ou seja, pontos do meio etéreo em que o éter está em movimento circular (BRUSH, 1974). Esse modelo de vórtices permitia um tratamento mecânico – adequado ao que se costuma chamar de ‘mecânica clássica’, ou seja, tratado em termos de corpos em movimento. Neste caso, os corpos seriam apenas a matéria do éter, substância que não se observa e, portanto, só pode ser averiguada em experimentos através de observações indiretas.

O modelo de vórtices será retomado por Maxwell em um de seus modelos propostos para o eletromagnetismo, como será visto no capítulo seguinte e consistem de pontos no meio (éter) em que ocorre um movimento rotatório. O movimento dos vórtices também age sobre outros objetos, como fluidos, que passam por eles. No caso do calor, esse fluido seria o ‘calorífico’, substância tida como sendo o próprio calor, concepção que é abandonada na época de Maxwell (DARRIGOL, 2000, pp. 151). No caso do eletromagnetismo, Maxwell propõe um fluxo, mas, como veremos, não busca estabelecer qual seria a natureza dessa substância que “flui”.

## 2 ELETROMAGNETISMO

O eletromagnetismo foi o campo em que Maxwell ficou mais conhecido, na medida em que propôs um tratamento matemático à teoria. Seu desenvolvimento de equações para trabalhar com os fenômenos elétricos e magnéticos terminou batizando o conjunto dessas equações com seu nome. Neste capítulo, vamos explorar o desenvolvimento da teoria do eletromagnetismo tendo em mente nossas questões iniciais, ou seja, buscar compreender de que modo se deu a criação científica, levando em conta o contexto da comunidade científica de sua época, seu meio sociocultural, suas visões filosóficas e religiosas, uma vez que o cientista parte de modelos e metáforas e logra obter resultados cuja extensão mudou o mundo em que vivemos de modo radical.

Como já apontamos, o físico trabalhou simultaneamente nos diversos campos de estudo aos quais se dedicou. A primeira publicação sobre o tema foi *On Faraday's Lines of Force* (MAXWELL, 1855b), em que valoriza o tratamento dado por Faraday e propõe um modelo mecânico que possibilita o tratamento matemático da teoria. Além disso, compila e adapta o conjunto de equações matemáticas que reúnem o tratamento da eletricidade e do magnetismo daquele momento. Em 1861, inicia a publicação de *On Physical Lines of Force* (MAXWELL, 1861b), longo artigo em quatro partes, em que continua o desenvolvimento da teoria, a partir do cálculo da velocidade da luz, incluindo a ótica em sua unificação teórica do eletromagnetismo, tomando a luz como onda eletromagnética. Publica, ainda, *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* (MAXWELL, 1865). Sua teoria do eletromagnetismo culminou com um livro que seria a composição ‘definitiva’ para a teoria, o *A Treatise of Electricity and Magnetism*<sup>11</sup>, (MAXWELL, 1873). Veremos, a seguir, para fins de compreender de que maneira os modelos e metáforas utilizados tiveram implicações teóricas e filosóficas, como foi o desenvolvimento de sua teoria do eletromagnetismo a cada uma dessas publicações. Evitaremos, entretanto, discutir os pormenores técnicos de cada proposta teórica, uma vez que fogem do escopo desta pesquisa.

Vale ressaltar aqui algo que não é explicitado pela teoria maxwelliana, e que remete a uma discussão hodierna: não se pode categorizar Maxwell nas posturas “realista”, “instrumentalista” ou “construtivista”. Fica claro, a partir da leitura dos textos do autor, que

---

<sup>11</sup> Para simplificar, a partir daqui, faremos referência a esta obra como “Tratado”.

sua postura diante da física dos fenômenos observados diretamente, ou seja, através da percepção “nua”, se qualifica como uma postura que, hoje, chamaríamos de “realista”, enquanto que sua aceitação das teorias físicas para fenômenos não observáveis, ou observáveis somente indiretamente, se qualificaria como uma postura que, hoje, chamaríamos de “instrumentalista”. Essa discussão sobre a possibilidade de conhecimento dos fenômenos não observáveis diretamente remete a toda a história das ideias. Dentro do limite de nossa pesquisa, e considerando que não podemos tentar categorizar o pensamento de Maxwell nesses termos sem correr o risco de anacronismo, deixamos de lado essas discussões. Entretanto, é importante lembrar essa distinção para melhor compreender a possibilidade da analogia como ponto de partida sólido para a produção de teorias. Ao partir do conhecimento existente dos fenômenos da mecânica, a rigor, para ele, sempre observáveis diretamente, Maxwell realiza a operação da analogia para campos de fenômenos não conhecidos que são, em última instância, apenas parcialmente observáveis, como no caso do eletromagnetismo<sup>12</sup>.

## 2.1 As linhas de faraday

Nas discussões que havia sobre o magnetismo em meados do século XIX, um problema causava sérias discordâncias entre os filósofos naturais. Tratava-se do problema de como descrever o mundo sem que houvesse ação à distância, uma vez que ou bem se encontrava uma explicação mecânica que satisfizesse a ideia de uma ação sem contato entre corpos, ou descrevia-se um mundo em que não ocorria ação à distância, tendo sempre toda ação algum contato entre os corpos envolvidos. Embora se colocasse do lado que defendia uma descrição da natureza sem ação à distância, Maxwell busca desenvolver sua teoria de modo que o tratamento matemático dado não dependesse da solução dessa controvérsia, ou seja, um tratamento que funcionasse havendo ou não ação à distância (ver, por exemplo, BEZERRA, 2006; HARMAN, 1998; WISE, 1979).

Em 1860, determinado a manter um compromisso com a produção de ciência com base em experimentação e quantificação, conforme defende em seu pronunciamento inaugural como professor em Aberdeen (MAXWELL, 1855a), em que além de defender a importância da medição e da quantificação, afirma a experimentação precisa, na cultura da prática do

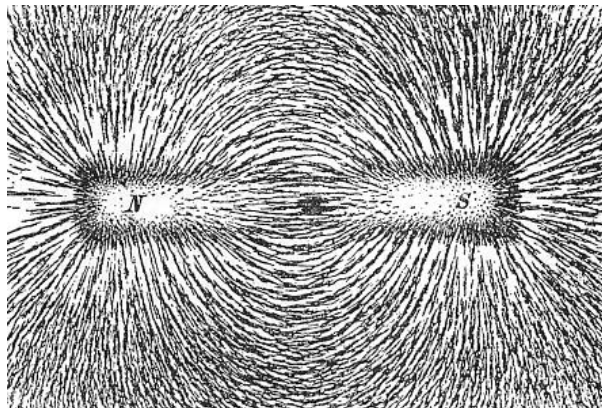
---

<sup>12</sup> O Prof. Dr. Fernando Fragozo foi quem chamou atenção para a necessidade desta explicação.

laboratório, como meio de expansão da ciência; e inspirado pela descrição do magnetismo terrestre realizado por Humbolt, busca estabelecer padrões para a eletricidade. Para isso, inicia dois projetos experimentais; medições elétricas e a busca de determinação da razão entre a eletricidade e o magnetismo (HARMAN, 1998, p. 61).

Essa busca tem seu primeiro fruto em seu primeiro artigo sobre eletricidade e magnetismo, em que Maxwell desenvolve o “raciocínio geométrico” para as linhas de força que Faraday havia descrito (VERSCHUUR, 2000, p. 139). Para Maxwell, ao contrário das críticas que Faraday havia recebido de que sua teoria para o magnetismo seria somente “descritiva” e não “matematizada” (HARMAN, 1998, p. 74), o trabalho de Maxwell tratava o problema de modo matemático sim, uma vez que propunha imagens que podiam ser tratadas geometricamente (WISE, 1979). Como ressalta Darrigol: “vinte anos depois da descoberta da indução eletromagnética, ele foi o primeiro teórico a levar Faraday tão sério a ponto de dar expressão matemática à sua lei da indução”<sup>13</sup> (DARRIGOL, 2000, p. 139). Maxwell desenvolve a analogia que Faraday introduz em que as linhas observadas ao se derramar limalha de ferro sobre uma folha de papel com um ímã sob ela seriam como tubos que conduziam a energia magnética, tomada como um fluido (Figura 5).

**Figura 5** – Linhas produzidas por limalha de ferro sobre um papel com um ímã permanente embaixo.



Fonte: BLACK, N., 1913, domínio público.

Os fenômenos observados para o magnetismo podiam ser descritos de modo bastante simples ao serem tomados como sendo um fluido que é conduzido por tubos. Isso permitiu Maxwell tratar o magnetismo usando as equações conhecidas para a dinâmica de fluidos. Haveria um meio, o “dielétrico”, proposto por Faraday para descrever os fenômenos de

<sup>13</sup> “Twenty years after the discovery of electromagnetic induction, he was the first theorist to take Faraday so seriously as to give a mathematical expression of his induction law” (DARRIGOL, 2000, pág. 139)

eletricidade estática, em que as partículas contíguas agiriam umas sobre as outras. Sua descrição contradizia a visão aceita para a indução, em que a ação seria à distância, mas, como já observado, Maxwell prefere não estabelecer uma posição definitiva quanto a essa discussão, ressaltando que essa ação de umas partículas sobre as outras não significava necessariamente que não haveria espaço entre as partículas (HARMAN, 1998, pp. 74-75). A proposta das linhas de força era algo diferente da ação à distância e da ação por contato, sendo uma proposta de “ação contígua” (BEZERRA, 2006).

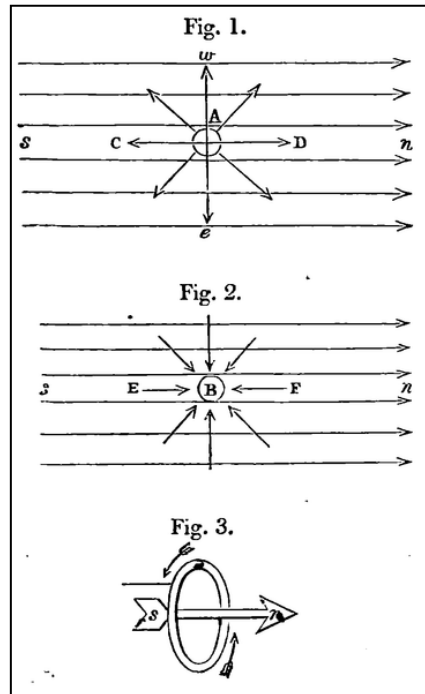
Para propor a ideia de linhas de força, Faraday havia reintroduzido o conceito de um meio “dielétrico”, no qual ocorreria o fluxo de energia eletromagnética (HARMAN, 1998, p. 77). Além disso, Thomson havia feito a analogia entre esse fluxo de energia proposto por Faraday, com o fluxo de calor estipulado pela teoria para a condução de calor. Maxwell atribui a Thomson a criação da analogia, mas, segundo Harman (1998, p. 77), este não tinha dado muito valor a essa analogia, sem perceber seu potencial explicativo (HARMAN, 1998, p. 78). A analogia que Maxwell faz com o calor, entretanto, afasta-se da analogia original de Thomson de diversas maneiras, pois ele substitui o calor por um ‘fluido incompressível imaginário’ em busca de uma analogia mais completa, já que o calor não era mais considerado uma substância. “Tratou o caso mais geral de condução heterogênea e anisotrópica, enquanto Thomson tinha se atido principalmente ao caso homogêneo. Mais importante, Maxwell integrou seus tubos e células geométricas na analogia e, assim, aumentou seu apelo intuitivo e poder demonstrativo”, produzindo um método sem cálculos, mas que requeria atenção e imaginação<sup>14</sup> (DARRIGOL, 2000, p. 143).

Em meio a uma profusão de “meios” que eram propostos teoricamente para dar conta da transmissão de movimento entre partículas, a saber, o “dielétrico” para a eletricidade e magnetismo, e o “calorífico”, para o fluxo de calor; Maxwell propõe que todos esses meios seriam um mesmo: tratava-se do “éter”, simplificando e unificando, assim, a teoria. Outra imagem importante introduzida por Faraday, ao descrever a influência de um ímã sobre uma corrente elétrica, foi a do “abraço mútuo” entre magnetismo e eletricidade; as correntes elétrica e magnética “abraçavam-se mutuamente” em uma relação perpendicular (Figura 6).

---

<sup>14</sup> O trecho todo é: “Maxwell’s resulting analogy, published in the first part of ‘On Faraday’s lines of force,’ departed from Thomson’s original heat analogy in several respects. Maxwell replaced heat with an ‘imaginary incompressible fluid,’ arguing that it would provide a more concrete analogy, since heat was no longer regarded as a substance. He treated the most general case of heterogeneous and anisotropic conduction, whereas Thomson had mostly confined himself to the homogenous case. Most important, Maxwell integrated his tubes-and-cells geometry in the analogy and thus increased its intuitive appeal and demonstrative power. His aim was to produce a method that ‘required attention and imagination but no calculation’” (DARRIGOL, 2000, p. 143).

**Figura 6** – O abraço mútuo entre eletricidade e magnetismo.



Fonte: MAXWELL, 1861b, domínio público.

O modelo que Maxwell apresenta para o eletromagnetismo com seu artigo sobre as linhas de Faraday pode ser descrito de modo simplificado da seguinte maneira: em um meio que a tudo perpassa, o “éter”, as partículas agem umas sobre as outras transmitindo a corrente elétrica. As linhas descritas por Faraday podem ser tidas como “tubos” através dos quais flui a “corrente” elétrica. Esse modelo permitiu não só a descrição geométrica das forças que envolvem o eletromagnetismo, como a quantificação das “cargas” elétricas. Partindo do modelo proposto por Faraday, Maxwell toma as equações propostas para a eletricidade, para o magnetismo e para o calor, existentes em seu tempo, a saber, Ampère, Stokes, Thomson e Faraday, adicionando alguns termos e reunindo-as num conjunto coeso (VERSCHUUR, 2000). O “fluxo” imaginário mostra-se potente metáfora para os fenômenos em questão. É interessante notar que a metáfora da “corrente”, tal qual nos fluidos, permanece até hoje como designação para o que ocorre em eletricidade, significando a “passagem” de energia elétrica de um ponto a outro.

Com o artigo *On Faraday's Lines of Force* (MAXWELL, 1855b), Maxwell inicia o desenvolvimento teórico que provocará profundas mudanças no modo de fazer ciência e de descrever o mundo (BEZERRA, 2006). Segundo Gooding (2006):

Faraday produziu uma abordagem poderosa e generalizante à compreensão da eletricidade, do magnetismo e de outras ‘forças da natureza’, usando métodos visuais que Maxwell posteriormente descreveu como matemática “da mais alta ordem”. Esses aspectos visuais do trabalho de Faraday permitem compreender uma característica importante do pensamento científico. Suas estratégias de raciocínio são exemplos das utilizadas por muitos cientistas antes dele e desde então, tornando os registros [de Faraday] fonte valiosa de informação sobre a função cognitiva ampla da imaginação visual e das representações externas, tais como esquemas, diagramas, modelos físicos, simulações e experimentos (GOODING, 2006)<sup>15</sup>.

Maxwell percebe o valor das imagens usadas por Faraday e da analogia com o fluxo de calor, usada por Thomson, e inicia o desenvolvimento de sua teoria. Logo após a publicação do artigo, entretanto, continua a desenvolver seu trabalho teórico. Conforme ressalta Peter Harman (1998, pág. 82), não ocorre uma modificação significativa na teoria, entre este artigo, o artigo seguinte, *On Physical Lines of Force* (MAXWELL, 1861b), e o terceiro artigo sobre o tema, *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* (MAXWELL, 1865) – o que ocorre é a percepção da teoria de modos diversos, descrita por Maxwell como olhar através da lente teórica utilizando magnitudes diferentes, para perceber o problema em “profundidades diferentes” (HARMAN, 1998, p. 82; MAXWELL, 1856a).

No primeiro tratamento dado à teoria, Maxwell reúne as equações existentes, propõe um modelo análogo ao que explica o fluxo de calor e o fluxo de líquidos e gases, em que a ‘resistência’ de um meio à eletricidade pode ser tomada de modo análogo à viscosidade dos gases que passam em um tubo, e utiliza a analogia geométrica de Thomson para o abraço mútuo entre eletricidade e magnetismo. Maxwell desenvolve a analogia de Thomson de modo mais direto e vívido que este, baseando-a na geometria de tubos de fluxo (DARRIGOL, 2000, p. 143). O resultado é um modelo em que eletricidade e magnetismo podem ser explicados como sendo o fluxo de energia que passa por tubos em um meio comum.

As “linhas de força” de Faraday permitiam a quantificação de intensidade e quantidade para os fenômenos elétricos e magnéticos de modo tão análogo que se podia fazer a correspondência entre os dois, conforme indicavam os experimentos da época. Maxwell inicia com a formulação errônea e verbalizada que Faraday dá ao conjunto teórico, mas que funciona como “meio de visualização de uma situação física complexa, que sugeriu novos

---

<sup>15</sup> Faraday produced a powerful, general new approach to understanding electricity, magnetism and other ‘powers of matter’ using visual methods that Maxwell later described as mathematics “of a very high order”. These visual aspects of Faraday’s work offer insights into an important feature of scientific thinking. His visual reasoning strategies are typical of those used by many scientists before and since, making his records a valuable source of information about the wider cognitive function of visual imagination and of external representations such as sketches, diagrams, physical models, simulations and experiments (GOODING, 2006).



modos criativos de tratar um velho problema” (WISE, 1979), dando tratamento matemático rigoroso à teoria. Sua abordagem engloba as diversas áreas de estudo do eletromagnetismo:

Maxwell explicou a analogia do fluido imaginário com vários domínios da eletricidade e do magnetismo. Para a eletrostática, os tubos de fluxo correspondem às linhas de indução elétrica de Faraday, a pressão ao potencial e a resistência do meio à capacidade indutiva do dielétrico. Para o magnetismo, os tubos de fluxo correspondem às linhas de força magnética de Faraday, a pressão do gradiente à ‘força resultante do magnetismo’, e a resistência do meio ao inverso da ‘potência de condução’ de Faraday para as linhas de força. Para a eletrocinética, os tubos de fluxo correspondem às linhas de corrente, a pressão ao potencial de tensão eletrostática, e a resistência do meio à resistência elétrica<sup>16</sup> (DARRIGOL, 2000, p. 144).

Faraday havia sido criticado por seu tratamento ao tema não ser ao estilo científico da época – descreve experimentos e faz esquemas das linhas magnéticas, sem, no entanto, quantificá-las. Por isso é criticado como não tendo sido “matemático”. Maxwell defende Faraday dessas críticas, afirmando serem as linhas de força um modelo geométrico e, portanto, matemático, uma linguagem física intuitiva (HARMAN, 1998, p. 74).

Para Wise, “o processo de criação de Maxwell é de considerável interesse para a história da ciência, pois ilustra de modo simples e claro a importância da pura *imaginação*” (WISE, 1979, grifo nosso). A imagem de um “abraço mútuo entre eletricidade e magnetismo” e de um “fluxo de partículas através de um meio num determinado campo” permitiu a analogia entre a hidrodinâmica, a termodinâmica, a eletricidade e o magnetismo (WISE, 1979). Essa analogia com o fluxo de um fluido é uma analogia “física” que permite abarcar todos os fenômenos eletromagnéticos, indo além da analogia do fluxo de calor proposta por Thomson e permitindo tratamento geométrico e aritmético que possibilita sua aplicação a esse campo de estudo (HARMAN, 1998, p. 89). Por ‘analogia física’, Maxwell refere-se a “aquela semelhança parcial entre as leis de uma ciência e as de outra, que faz com que cada uma seja uma ilustração da outra”<sup>17</sup> (MAXWELL, 1855b, p.156). Além disso, o próprio desenvolvimento da construção teórica em torno da analogia física marca o início da ‘desmecanização’ da física (BEZERRA, 2006).

---

<sup>16</sup> “Maxwell explained the analogy of the imaginary flow with various domains of electricity and magnetism. For electrostatics, the tubes of flow correspond to Faraday’s lines of electric induction, the pressure to the potential, and the resistance of the medium to the inductive capacity of the dielectric. For magnetism, the tubes of flow correspond to Faraday’s magnetic lines of force, the pressure gradient to ‘the resultant force of magnetism,’ and the resistance of the medium to the inverse of Faraday’s ‘conducting power’ for the lines of force. For electrokinetics, the tubes of flow correspond to the lines of current, the pressure to the electrostatic potential of tension, and the resistance of the medium to the electric resistance” (DARRIGOL, 2000, pág 144).

<sup>17</sup> “that partial similarity between the laws of one science and those of another which makes each of them illustrate the other” (MAXWELL, 1855b, p. 156).

Essa analogia ainda tem o desdobramento surpreendente de estender-se para a óptica. Provavelmente sem que o soubesse, experimentos realizados para medir a velocidade da luz apresentaram valores muito próximos ao que Maxwell havia calculado para as ondas eletromagnéticas, uma extensão puramente matemática de seu desenvolvimento teórico. Concebendo um meio em que os fenômenos eletromagnéticos ocorriam, Maxwell deduz dos cálculos uma possível onda que se propagaria nesse meio, as ondas eletromagnéticas. O valor para a velocidade obtido com esses cálculos aproximava-se muito daquele apresentado como resultado dos experimentos para estabelecer o valor da velocidade da luz. Esse fato, coloca a analogia com a luz também entre os fenômenos eletromagnéticos (WISE, 1979; HARMAN, 1998, p. 114). O ‘abraço mútuo’ é a imagem que, segundo Wise, “ancorou as ideias de Maxwell, de início ao fim, numa estrutura geometricamente sólida sobre a qual toda especulação podia ser amarrada” (WISE, 1979).

O tratamento aritmético e geométrico dado, com base em ‘analogias físicas’, é feito sem ‘comprometer-se’ com teorias físicas, ou seja, sem subscrever a nenhuma ontologia específica. “O fluido incompressível era puramente imaginário, a intensidade eletrotônica puramente simbólica”<sup>18</sup> (DARRIGOL, 2000, p. 147). Desejava, entretanto, “descobrir um método de formar uma concepção mecânica para o estado eletrotônico adaptado ao raciocínio geral”<sup>19</sup> (MAXWELL, 1855b, p.188). Para dar conta do problema da ação à distância, além da necessidade de oferecer um tratamento mais “mecanicista” à sua teoria, Maxwell não se atém a essas metáforas e continua a desenvolver sua teoria, buscando aprofundá-la. Para isso, lança mão de outros modelos, como veremos a seguir.

## 2.2 Linhas de força

O artigo *On Physical Lines of Force* (MAXWELL, 1861b) é extenso. Dividido em quatro partes, foi publicado entre 1861 e 1862. Basicamente, o artigo oferece tratamento matemático à teoria eletromagnética, persistindo em sua analogia com a hidrodinâmica. Aqui, Maxwell oferece um novo modelo para o eletromagnetismo, em que uma explicação plausível para os fenômenos é dada através de uma descrição assumidamente fictícia, mas cuja

---

<sup>18</sup> “The incompressible fluid was purely imaginary, the electro-tonic intensity purely symbolic” (DARRIGOL, 2000, p. 147).

<sup>19</sup> “To discover a method of forming a mechanical conception of the electro-tonic state adapted to general reasoning” (MAXWELL, 1855b, p. 188).

plausibilidade serve para demonstrar como uma explicação estritamente mecânica para os fenômenos é possível. A aposta de Maxwell de que o raciocínio matemático produz, inevitavelmente, bons resultados na descrição do mundo será explorada mais adiante e, como foi notado no capítulo anterior, reside em sua crença de que Deus fez o mundo de modo unificado e que nós, como parte do mundo, possuímos capacidade de raciocínio também análoga ao mundo, o que possibilita essa ligação. Embora seja clara a intenção de Maxwell de produzir uma teoria totalmente ancorada no mecanicismo, ou seja, que pode ser reduzida à explicação de corpos em movimento, esse vínculo com uma “mecânica clássica” não é necessário nem mandatário para o autor, como também foi notado no capítulo anterior. De qualquer maneira, já no início do artigo, percebemos a característica explicação dos fenômenos como sendo o de “corpos em movimento”:

Em todos os fenômenos envolvendo atrações ou repulsões, ou quaisquer forças dependendo das posições relativas de corpos, precisamos determinar a *magnitude* e *direção* da força que age sobre um dado corpo, quando colocado em determinada posição<sup>20</sup> (MAXWELL, 1861b, p. 451, grifos no original).

Outro aspecto que queremos ressaltar é o fato de que Maxwell utiliza a ideia de “vórtices” para estabelecer seu modelo mecânico do eletromagnetismo. Como visto no capítulo anterior, essa “teoria dos vórtices moleculares” é, sem dúvida, a teoria dinâmica dos gases apresentada por Clausius, sobre a qual Maxwell trabalhava concomitantemente (DARRIGOL, 2000, pp. 148ss). Isso deixa claro que, se por um lado o modelo proposto trata dos fenômenos eletromagnéticos como fenômenos descritos como “corpos em movimento”, por outro, não há um compromisso ontológico realista para o modelo. Em outras palavras, enquanto o modelo propõe o tratamento de entidades plausíveis para as quais se pode aplicar as leis da mecânica, por outro, os componentes do modelo não são, necessariamente, objetos sólidos, embora possam ser tratados como se comportando como tal. As implicações disto serão exploradas nos próximos capítulos.

Em seguida ao texto citado, Maxwell retoma a discussão iniciada em seu primeiro artigo sobre o eletromagnetismo, estabelecendo o panorama teórico mecanicista sobre o qual vai desenvolver seu modelo.

No caso de um corpo sobre o qual age a gravitação de uma esfera, essa força é o inverso do quadrado da distância, e está em linha reta com relação ao centro da

---

<sup>20</sup> In all phenomena involving attractions or repulsions, or any forces depending on the relative position of bodies, we have to determine the *magnitude* and *direction* of the force which would act on a given body, if placed in a given position (MAXWELL, 1861b, p. 451).

esfera. No caso de duas esferas atraindo-se, ou de um corpo não esférico, a magnitude e direção da força varia de acordo com leis mais complicadas. Nos fenômenos elétricos e magnéticos, a magnitude e a direção da força resultante em qualquer ponto é conhecida, então, caso se desenhe uma linha de modo que todas as partes do seu curso coincidam em direção com a força naquele ponto, essa linha pode ser chamada *linha de força*, já que indica a direção da força em cada parte de seu curso. Desenhando número suficiente de linhas de força, podemos indicar a direção da força em cada parte do espaço no qual atua<sup>21</sup> (MAXWELL, 1861b, p. 451, grifo no original).

Maxwell percebe que a mesma relação existente na lei da gravitação universal pode ser aplicada ao magnetismo. Essa analogia direta não parece ser garantida por nenhuma evidência, afinal, trata-se de fenômenos cuja observação é limitada – observam-se os efeitos do magnetismo, mas não se pode observar o “magnetismo em si”, ou seja, os corpos ou objetos envolvidos no fenômeno, de características microscópicas. Essa analogia, entretanto, é indicada pelos experimentos feitos por ele e por seus contemporâneos, em que a relação do inverso do quadrado fica evidente.

Observe-se, ainda, que o autor ressalta o fato de que, em seu modelo, as linhas não somente podem ser traçadas – como de fato ocorre no experimento descrito a seguir – as linhas “aparecem” caso se tome todos os pontos de força que se produzem ao se observar o espaço em torno de um ímã. Além disso, as linhas “parecem” estar lá, ou seja, ser “algo mais do que a mera resultante de duas forças” (MAXWELL, 1861b).

Assim, se jogarmos limalha de ferro sobre um papel próximo a um ímã, cada pedaço de limalha será magnetizado por indução, e os pedaços contíguos se unirão por polos opostos, como se formassem fibras, e essas fibras *indicarão* a direção das linhas de força. Essa linda ilustração da presença da força magnética proporcionada por esse experimento naturalmente tende a nos fazer pensar nas linhas de força como algo real, e como indicando algo mais do que a mera resultante de duas forças, cujo local de ação está à distância, e que não existe de modo algum até que um ímã é colocado naquela parte do campo. Não estamos satisfeitos com a explicação fundada na hipótese de forças atrativas e repelentes direcionadas pelos polos magnéticos, ainda que estejamos satisfeitos com o fato de que o fenômeno está em acordo estrito com essa hipótese, e não podemos deixar de pensar que em todos lugares onde encontramos essas linhas de força, algum estado físico ou ação precisa existir com energia suficiente para produzir o fenômeno de fato<sup>22</sup> (MAXWELL, 1861b, p. 451).

<sup>21</sup> “In the case of a body acted on by the gravitation of a sphere, this force is inversely as the square of the distance, and in a straight line to the centre of the sphere. In the case of two attracting spheres, or of a body not spherical, the magnitude and direction of the force vary according to more complicated laws. In electric and magnetic phenomena, the magnitude and direction of the resultant force at any point is the main subject of investigation. Suppose that the direction of the force at any point is known, then, if we draw a line so that in every part of its course it coincides in direction with the force at that point, this line may be called a *line of force*, since it indicates the direction of the force in every part of its course.

By drawing a sufficient number of lines of force, we may indicate the direction of the force in every part of the space in which it acts” (MAXWELL, 1861b, p. 451).

<sup>22</sup> “Thus if we strew iron filings on paper near a magnet, each filing will be magnetized by induction, and the consecutive filings will unite by their opposite poles, so as to form fibres, and these fibres will *indicate* the direction of the lines of force. The beautiful illustration of the presence of magnetic force afforded by this

Esse trecho deixa evidente que, primeiro, Maxwell busca desenvolver sua teoria a partir do pressuposto de que não existe “ação à distância”, tomada de posição que seria oposta à observação dos fenômenos, como indica no trecho citado. Além disso, deixa claro que concederá existência factual às linhas em si, que serão mais que somente a simbolização da trajetória dos corpos em movimento, mas constituem objetos em si mesmos. As linhas, como veremos, são o conjunto de vórtices no éter que “transmitem” a força eletromagnética. Apesar de fazer essa afirmação de natureza ontológica forte, o autor mantém ser “especulação”, ou seja, ele não se propõe a fazer uma descrição “realista” dos objetos em questão, mas

esclarecer o modo de especulação nessa direção, investigando os resultados mecânicos de certos estados de tensão e movimento num meio, e comparando-os com esses fenômenos de magnetismo e eletricidade observados. Ao ressaltar as consequências mecânicas dessas hipóteses, espero que seja útil aos que consideram os fenômenos como ação de um meio, mas que estão em dúvida com relação a esta hipótese para as leis experimentais já estabelecidas, que foram expressas de modo genérico na linguagem de outras hipóteses (MAXWELL, 1861b, p. 452)<sup>23</sup>.

Segue fazendo referência direta ao artigo anterior, *On Faraday's Lines of Force* (MAXWELL, 1855b), em que demonstra geometricamente as relações entre as linhas de força e o espaço, “usando a concepção de correntes num fluido”, mostra “como desenhar essas linhas de força”. Quanto maior o número de linhas, maior a “quantidade de força, de modo que cada linha pode ser chamada de unidade-linha de força” (MAXWELL, 1861b). No artigo anterior, mostrou essas relações, quantificando-as e descrevendo-as utilizando a geometria. Neste artigo, propõe-se a analisar os fenômenos com mais profundidade. Continua:

No mesmo artigo, encontrei o significado do “Estado Electrotônico”, e mostrei como deduzir as relações matemáticas entre o estado electrotônico, o magnetismo, as correntes elétricas e a força electromotiva, *usando ilustrações*

---

experiment, naturally tends to make us think of the lines of force as something real, and as indicating something more than the mere resultant of two forces, whose seat of action is at a distance, and which do not exist there at all until a magnet is placed in that part of the field. We are dissatisfied with the explanation founded on the hypothesis of attractive and repellent forces directed towards the magnetic poles, even though we may have satisfied ourselves that the phenomenon is in strict accordance with that hypothesis, and we cannot help thinking that in every place where we find these lines of force, some physical state or action must exist in sufficient energy to produce the actual phenomena” (MAXWELL, 1861b, p. 451).

<sup>23</sup> “My object in this paper is to clear the way for speculation in this direction, by investigating the mechanical results of certain states of tension and motion in a medium, and comparing these with the observed phenomena of magnetism and electricity. By pointing out the mechanical consequences of such hypotheses, I hope to be of some use to those who consider the phenomena as due to the action of a medium, but are in doubt as to the relation of this hypothesis to the experimental laws already established, which have generally been expressed in the language of other hypotheses” (MAXWELL, 1861b, p. 452).

*mecânicas para ajudar à imaginação, mas não para dar conta dos fenômenos* (MAXWELL, 1861b, p. 452, grifo nosso)<sup>24</sup>.

Esse trecho mostra, claramente, o que já foi indicado: a descrição mecânica tem o objetivo de “auxiliar à imaginação”, não é uma proposta de descrição dos fenômenos tais como são e Maxwell segue mantendo o mesmo propósito, o de “examinar fenômenos magnéticos de um ponto de vista mecânico”; de determinar que “tensões” ou “movimentos” de um meio “são capazes de produzir os fenômenos mecânicos observados”. A relação entre a atração magnética, os fenômenos eletromagnéticos e as correntes por indução será demonstrada por uma teoria unificada que, segundo o autor, só poderá ser provada “errônea” por experimentos (MAXWELL, 1861b, p. 452)<sup>25</sup>, mais uma vez deixando claro o seu forte vínculo com a experimentação.

Continua analisando as possibilidades já consideradas por outros autores, para descrever as “condições mecânicas de um meio sob influência magnética”, que poderiam ser “correntes, ondulações ou estados de deslocamento ou tensão, ou de pressão ou estresse”<sup>26</sup> (MAXWELL, 1861b, p. 453), descartando essas possibilidades como analogias que não são adequadas o suficiente. Ressalta, em seguida, a analogia feita por Thomson entre o deslocamento angular de partículas num meio ondulatório e o estado eletrotônico de um campo magnético – Thomson “não tentou explicar as origens das forças observadas” [...] “mas fez uso das analogias matemáticas [entre os] dois problemas para auxiliar a imaginação no estudo de ambos”<sup>27</sup> (MAXWELL, 1861b, p. 453).

---

<sup>24</sup> “In the same paper I have found the geometrical significance of the "Electrotonic State," and have shown how to deduce the mathematical relations between the electrotonic state, magnetism, electric currents, and the electromotive force, using mechanical illustrations to assist the imagination, but not to account for the phenomena” (MAXWELL, 1861b, p. 452).

<sup>25</sup> O trecho inteiro é: “I propose now to examine magnetic phenomena from a mechanical point of view, and to determine what tensions in, or motions of, a medium are capable of producing the mechanical phenomena observed. If, by the same hypothesis, we can connect the phenomena of magnetic attraction with electromagnetic phenomena and with those of induced currents, we shall have found a theory which, if not true, can only be proved to be erroneous by experiments which will greatly enlarge our knowledge of this part of physics” (MAXWELL, 1861b, p. 452).

<sup>26</sup> “The mechanical conditions of a medium under magnetic influence have been variously conceived of, as currents, undulations, or states of displacement or strain, or of pressure or stress” (MAXWELL, 1861b, p. 453).

<sup>27</sup> O trecho inteiro é: “In the Cambridge and Dublin Mathematical Journal for January 1847, Professor William Thomson has given a "Mechanical Representation of Electric, Magnetic, and Galvanic Forces," by means of the displacements of the particles of an elastic solid in a state of strain. In this representation we must make the angular displacement at every point of the solid proportional to the magnetic force at the corresponding point of the magnetic field, the direction of the axis of rotation of the displacement corresponding to the direction of the magnetic force. The absolute displacement of any particle will then correspond in magnitude and direction to that which I have identified with the electrotonic state; and the relative displacement of any particle, considered with reference to the particle in its immediate neighbourhood, will correspond in magnitude and direction to the

Maxwell atribui a ideia da analogia entre os dois campos da física a Thomson, buscando inclusive deixar claro ao colega que iria usar sua analogia, não querendo tomar para si o crédito de tê-la percebido, mas indo além, pois Thomson não teria persistido na ideia (WISE, 1979; DARRIGOL, 2000, p. 148). Ao superar Thomson no uso da analogia, estabelecendo, através de uma relação matemática, uma forte analogia “física” entre campos distintos (hidrodinâmica e magnetismo, por exemplo), Maxwell pode ser considerado fundador de uma nova maneira de fazer física, ou, como afirma Peter Harman, o criador da “física matemática”. De fato, busca dar crédito ao colega, escrevendo-lhe “você tem os cálculos na sua mesa” (MAXWELL, *apud* HARMAN, 1998, p. 82). Thomson não está voltado a pesquisar o eletromagnetismo e deixa a Maxwell essa tarefa. Isso se dá, segundo Harman, devido à diferença entre os dois: enquanto Thomson seria um “matemático com um toque de física”, Maxwell era um “filósofo natural” e essa diferença se traduziria no “estilo da escrita” que havia entre os dois (HARMAN, 1998, p. 82).

Maxwell dedica-se, então, a “descrever a origem dos fenômenos observados”. A descrição do magnetismo, feita por Thomson, como “tensão” ou “estresse” no meio em “diferentes direções” que se combinam a “ângulos retos entre si” formam a base sobre a qual Maxwell constrói seu modelo mecânico para o eletromagnetismo. Esse modelo mecânico que constrói consistirá de descrever o meio, ou o éter, como composto por vórtices moleculares sobre os quais agem as forças magnéticas, num complexo emaranhado de polias e roldanas, catracas e rolamentos, conforme ilustrado na Figura 7.

A tensão magnética é descrita como análoga a de uma corda, e suas tensões como análogas ao fluxo hidrodinâmico. Para Darrigol (2000, p. 151), esse modelo “maravilhoso” permite a Maxwell demonstrar a possibilidade de reduzir as ações eletromagnéticas a “ações mecânicas contíguas”<sup>28</sup>.

Mas essas analogias não são suficientes: para completar a explicação toma a “força” magnética como análoga à luz polarizada. Essa aproximação é crucial na unificação dos campos até então distintos: eletricidade, magnetismo e óptica. Entretanto, como explica Harman (1998, p. 109), ao apresentar este artigo entre 1861 e 62, ainda não concebe a luz como onda eletromagnética, mas como um processo mecânico, ou seja, diferentes

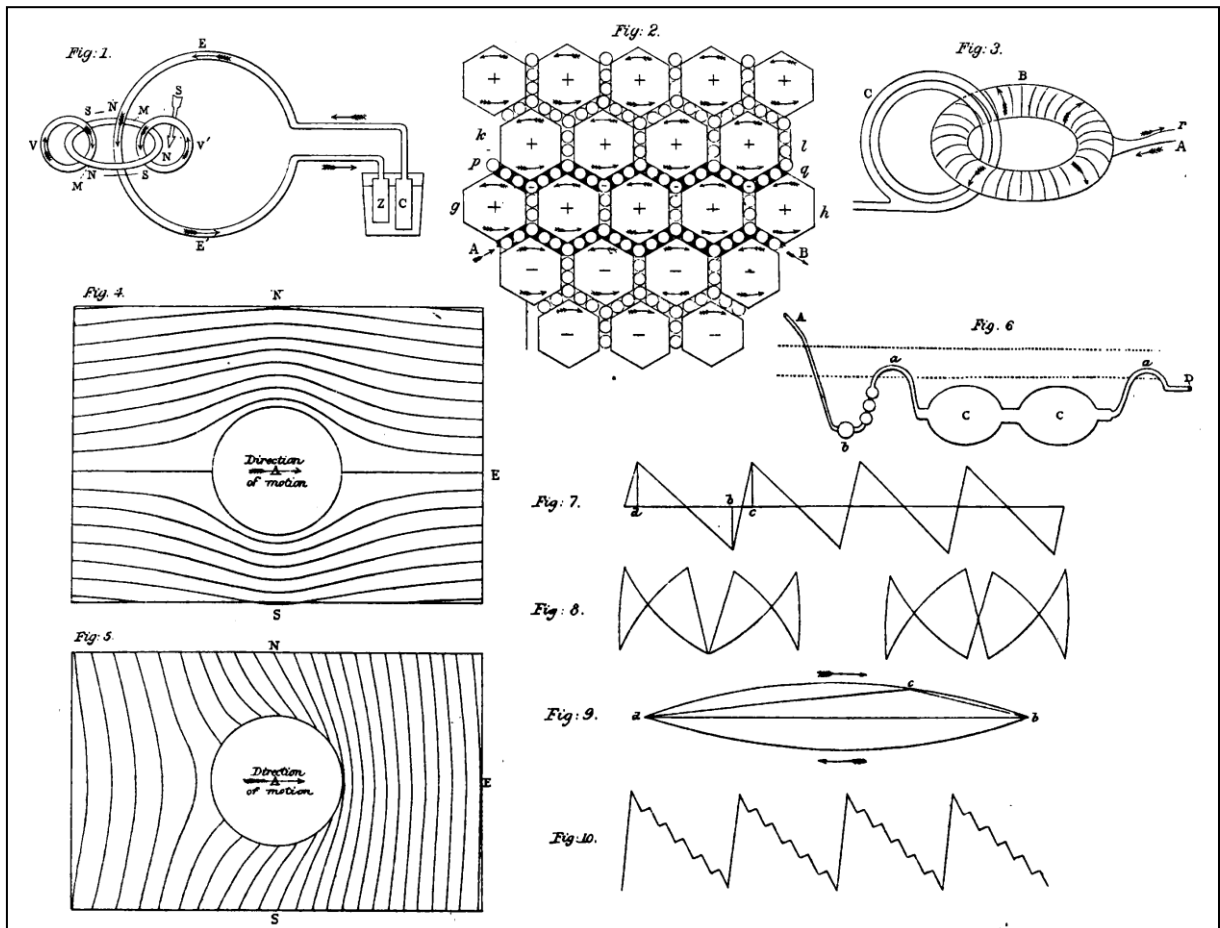
---

quantity of electric current passing through the corresponding point of the magneto-electric field. The author of this method of representation does not attempt to explain the origin of the observed forces by the effects due to these strains in the elastic solid, but makes use of the mathematical analogies of the two problems to assist the imagination in the study of both” (MAXWELL, 1861b, p. 453).

<sup>28</sup> “With his wonderful model Maxwell demonstrated the possibility of reducing electromagnetic actions to contiguous mechanical actions” (DARRIGOL, 2000, p. 151).

movimentos de moléculas no éter. Esse período entre a publicação das primeiras duas partes do artigo e as duas últimas foi marcado por intensa correspondência entre Maxwell, Thomson e Faraday, entre outros (HARMAN, 1998, pp. 109ss).

**Figura 7** – Modelos mecânicos, relação perpendicular entre magnetismo e eletricidade e ondulações.



Fonte: Domínio público. Disponível em: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:MaxwellPhys1-10.png>  
Acessado em: junho de 2013.

Em dezembro de 1861, em carta a um colega de Cambridge, Maxwell escreve, antes de publicar as duas partes finais de *Physical lines*, “estou tentando formar uma expressão matemática exata de tudo que é conhecido sobre eletromagnetismo sem a ajuda de hipóteses”<sup>29</sup> (apud HARMAN, 1998, p. 113). De fato, neste artigo, afirma que a hipótese dos vórtices é uma hipótese “desajeitada” ou “complicada” (*awkward*) e que esse modelo de

<sup>29</sup> “I am trying to form an exact mathematical expression for all that is known about electro-magnetism without the aid of hypothesis.” (apud HARMAN, 1998, p. 113).



células de vórtices e partículas esféricas livres, moléculas de éter em movimento, funcionaria somente como “hipótese temporária e provisória” (MAXWELL, 1861b, p. 486). Para Harman, seu cuidado com a justificação para a teoria de vórtices moleculares foi explicitada e levou-o a transcender suas limitações. Tratava-se de uma teoria legítima como “estratégia de explicação” (*explanation strategy*) (HARMAN, 1998, p. 113).

A parte final do artigo é publicada em fevereiro de 1862 e afirma:

Precisamos agora investigar se a hipótese desenvolvida neste artigo – de que a força magnética se deve à força centrífuga de pequenos vórtices, e de que esses vórtices consistem da mesma matéria que as vibrações que constituem a luz – leva a alguma conclusão sobre o efeito do magnetismo sobre a luz polarizada (MAXWELL, 1861b, p. 506)<sup>30</sup>.

Esse efeito é o observado em experimentos realizados por Émile Verdet, para os quais Faraday chama atenção de Maxwell em correspondência entre os dois (HARMAN, 1998, p. 110). Isso é um exemplo de como, embora o trabalho de Maxwell fosse calcado na crença de um mundo unificado por Deus – e, portanto, passível de ser abordado por meio de analogias – essa analogia entre o eletromagnetismo não foi feita gratuitamente, mas teve como base a observação experimental.

Para Harman, a hipótese dos vórtices provou-se inesperadamente produtiva e completa, mais do que a analogia de partículas em colisão utilizada na teoria dos gases. Os dois trabalhos, entretanto, foram movidos pelo mesmo impulso: avançar além do modelo geométrico, além de um “exercício em mecânica” (HARMAN, 1998, pp. 111, 112). Maxwell cria uma linguagem para a teoria de campos, formulando leis que expressam relações entre forças magnéticas e elétricas num modelo geométrico para os fenômenos físicos (MAXWELL, 1855b). Já neste artigo, representa a intensidade de forças num ponto, introduzindo a analogia física de movimento num fluido imaginário. Tendo levado a efeito o objetivo de mostrar um modelo mecânico plausível para explicar o eletromagnetismo, Maxwell busca, nas duas partes finais do artigo, reduzir a teoria ao seu aspecto matemático, tornando-a indiferente às hipóteses de base, como ação à distância ou éter: busca tornar sua teoria matemática compatível com as duas propostas, ou independente delas. Na terceira parte do artigo ele estende a teoria para a eletrostática. Resolve dois problemas para a teoria de vórtices: uma explicação para a carga elétrica estática e uma representação do mecanismo de

---

<sup>30</sup> “We have now to investigate whether the hypothesis developed in this paper – that magnetic force is due to the centrifugal force of small vortices, and that these vórtices consist of the same matter the vibrations of which constitute light – leads to any conclusions as to the effect of magnetism on polarized light” (MAXWELL, 1861b, p. 506).

interação das partículas livres com as superfícies fluidas dos vórtices. A estrutura mecânica do éter elástico tem um análogo elétrico (HARMAN, 1998, p. 106). Além disso, ao perceber que a elasticidade dos vórtices, necessária à sua ligação mecânica, produzia vibrações transversais. Ao calcular a velocidade de propagação dessas vibrações e deparar com valor muito próximo ao da velocidade da luz, e pode concluir que a luz consiste de ondulações nesse mesmo meio (DARRIGOL, 2000, pp. 151-154).

Entretanto, como ressalta Harman, “O argumento [...] era limitado por um problema filosófico, uma questão de explicação científica: a validade geral dos resultados estava ligada muito estreitamente ao modelo mecânico do éter” (HARMAN, 1998, p. 112).

### 2.3 Uma teoria dinâmica do eletromagnetismo

Um dos resultados do artigo de 1861-62, foi o estabelecimento da razão entre “unidades eletromagnéticas e eletrostáticas”, que correspondia à “propagação de uma perturbação num éter eletromagnético” (HARMAN, 1998, p. 65). O valor da velocidade de propagação dessa onda era um valor muito próximo àquele calculado em experimentos feitos por Weber e Kohlrausch para determinar a velocidade da luz. Maxwell afirma não ter tido conhecimento dos resultados dos experimentos e que essa coincidência o permitia afirmar ter estabelecido, independente de qualquer hipótese, que as perturbações eletromagnéticas propagavam-se como ondas transversas, assim como a luz – e que a luz pode ser tratada como onda eletromagnética (HARMAN, 1998, p. 114; DARRIGOL, 2000, p. 153). Esse acontecimento, além do trabalho para o Comitê de padrões elétricos, em colaboração com Fleeming Jenkin, em 1863, ajudou a dar forma à estratégia utilizada em *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* (MAXWELL, 1865).

Neste artigo, em vez de hipóteses físicas que trazem conclusões apressadas, prefere obter uma “ideia física sem adotar uma teoria física” (*apud* HARMAN, 1998, p. 71) e usa a geometria e a analogia, no lugar das hipóteses e modelos do artigo de 1861-62. Para ele, o modelo do éter era “inconcebível” e “enevado” e pode ser descartado, agora, no artigo de 1865 (HARMAN, 1998, p. 113). Escreve a seu amigo Stokes que já possui “material para calcular a velocidade de transmissão dos distúrbios magnéticos fundamentado em evidências experimentais sem qualquer hipótese sobre a estrutura do meio, nem explicação mecânica para eletricidade ou do magnetismo” (*apud* HARMAN, 1998, p. 113).

Com este artigo, Maxwell afirma ter obtido uma “teoria eletromagnética da luz”, sem referência a um modelo de éter ou às analogias mecânicas empregadas em *Physical lines* (DARRIGOL, 2000, p. 155). Tendo encontrado uma interpretação mecânica par ao estado eletrotônico com base no modelo de vórtices, por volta de 1864 percebe que a interpretação não dependia de nenhum mecanismo específico e que poderia “servir como fundamento mais abstrato para uma dinâmica do campo magnético”, simplesmente admitindo algum mecanismo de conexão, o que implicaria em movimento no campo circundante<sup>31</sup> (DARRIGOL, 2000, p. 157).

É em *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* (MAXWELL, 1865) que Maxwell estabelece suas equações, que continuarão sendo utilizadas até nossos dias, independente do modelo ontológico que se pretenda descreverem.

Assim como as equações do campo eletromagnético, também a descrição de Maxwell das *ondas eletromagnéticas* continua válida ainda hoje. Como se sabe, a derivação de uma equação diferencial parcial descrevendo uma onda transversal que se propaga com a velocidade da luz depende da simetria entre os campos elétrico e magnético nas equações de Maxwell. Olhando retrospectivamente, vemos que é a introdução do termo da “corrente de deslocamento”  $\partial D/\partial t$  que permite instaurar essa simetria. Outros argumentos de simetria estarão envolvidos na assimilação do eletromagnetismo pela relatividade restrita (BEZERRA, 2006, grifo no original).

Maxwell aposta na simetria das equações como critério de beleza e harmonia, um sinal de que nos aproximamos de maneira correta da criação divina (THEERMAN, 1986; LAMBERT, 2010; STANLEY, 2012).

Esse período, em que Maxwell trabalha como professor no King’s College, é caracterizado pelo uso de instrumentos de laboratório precisos, com padrões rigorosos para medições e Maxwell enfatiza a importância da matemática na construção e utilização desses aparelhos. Uma das aplicações práticas do trabalho sobre eletromagnetismo é o estabelecimento do telégrafo e Maxwell participa do Comitê de engenharia. Utilizam um sistema de unidades “absoluto” para massa, comprimento e tempo. É nesse período que Maxwell realiza, no pátio do King’s College, diversos experimentos em busca de estabelecer a unidade de resistência elétrica (Ohm), embora sem sucesso (HARMAN, 1998, p. 62). Esses

---

<sup>31</sup> O trecho todo é: “Maxwell reached this mechanical interpretation of the electrotonic state in 1861, on the basis of the vortex model. Three years later, he realized that the interpretation was essentially independent of any specific mechanism and could serve as a more abstract foundation for the dynamics of the magnetic field. He simply admitted that through an unspecified connected mechanism the existence of an electric current implied a motion in the surrounding field.” (DARRIGOL, 2000, p. 157).

esforços o levam a ser escolhido para projetar e construir o laboratório Cavendish, em Cambridge, empreendimento ao qual se dedica a partir de então e Cambridge adquire equipamentos para a determinação da unidade de resistência (HARMAN, 1998, p. 64).

Os experimentos em laboratório são de natureza tanto propedêutica quanto exploratória e o físico enfatiza a necessidade de que exigem domínio da matemática e medição precisa, estabelecendo o estilo do laboratório Cavendish (HARMAN, 1998, p. 67). Essa ênfase na experimentação e no uso da matemática aplicada à quantificação desses experimentos é ressaltada por Maxwell no prefácio ao seu Tratado (MAXWELL, 1873).

## 2.4 O tratado do eletromagnetismo

A partir de 1865, Maxwell dedica-se a escrever o tratado de eletromagnetismo. Nesse período, leciona e trabalha no estabelecimento do laboratório Cavendish, em Cambridge, participa da banca avaliadora do exame Tripos (HARMAN, 1998, pp. 69-70). Sabe-se que os avaliadores também eram tutores dos próprios candidatos, num trabalho individualizado (THEERMAN, 1986; LAMBERT, 2010; STANLEY, 2012). Luta pela inclusão de questões com o tema do eletromagnetismo no exame, pois sente que o tema já está amadurecido o suficiente para ser incluído (DARRIGOL, 2000, p. 166).

Publicado em 1868, o tratado não é um simples resumo dos artigos publicados anteriormente, uma maneira de organizar seus escritos para si mesmo, “educar-se, apresentando uma visão do estágio que havia alcançado” (EVERITT, 2007). Não obstante, o livro é organizado bem à maneira didática da época, apresentando inicialmente as bases da física sobre as quais está fundado e apresentando sistematicamente os assuntos, daquele de mais simples compreensão, aos mais complexos. A proposta do Tratado é ser um compêndio que abarca toda a teoria do eletromagnetismo, além de ser ferramenta para “interpretar a natureza e promover o progresso da ciência” (MAXWELL, *apud* EVERITT, 2007). No prefácio, lê-se:

No seguinte Tratado, proponho descrever os mais importantes desses fenômenos, mostrar como podem sujeitar-se à medição e traçar as conexões matemáticas das quantidades medidas. Tendo, assim, obtido os dados para uma teoria matemática do eletromagnetismo, e tendo mostrado como essa teoria pode ser aplicada ao cálculo de fenômenos, buscarei colocar sob a luz mais clara possível as relações entre a forma matemática dessa teoria e aquela da ciência fundamental da Dinâmica, de

modo que possamos, em alguma medida, estar preparados para determinar os tipos de fenômenos dinâmicos dentre os quais buscaremos ilustrações ou explicações de fenômenos eletromagnéticos. Ao descrever os fenômenos, selecionarei aqueles que ilustram mais claramente as ideias fundamentais da teoria, omitindo outros, ou reservando-os ao leitor mais avançado.<sup>32</sup> (MAXWELL, 1873, p. vi).

O Tratado se tornou livro-texto para a matéria por um bom período que se seguiu. Embora esse trecho afirme apresentar a teoria de acordo com a “Dinâmica”, o que levaria a entender que seria descrita em termos de “corpos em movimento” e, assim, dentro do que se espera para uma “visão mecanicista”, o fato é que sua teoria, como bem aponta Brush (1974), dispensa a postulação de entidades ontológicas precisas, lançando mão somente de analogias e metáforas como ilustração à descrição estritamente matemática que faz dos fenômenos. Para Maxwell, “o aspecto mais importante de qualquer fenômeno, de um ponto de vista matemático, é o da quantidade mensurável” e descreve os fenômenos elétricos dando ênfase a isso, “descrevendo os métodos de mensuração e definindo os padrões dos quais dependem”<sup>33</sup> (MAXWELL, 1873, p. vi). Além disso,

As relações internas dos diferentes ramos da ciência que temos para estudo são mais numerosas e complexas que aquelas de qualquer outra ciência até aqui desenvolvida. Suas relações externas, de um lado a dinâmica, e de outro, calor, luz, ação química e a constituição dos corpos parecem indicar a importância especial da ciência elétrica como ajuda na interpretação da natureza<sup>34</sup> (MAXWELL, 1873, p. vii).

A menção da dinâmica como ponto principal serve para garantir que “nenhum fenômeno elétrico é contraditório à suposição de que tudo depende de ação puramente

---

<sup>32</sup> “In the following Treatise I propose to describe the most important of these phenomena, to shew how they may be subjected to measurement, and to trace the mathematical connexions of the quantities measured. Having thus obtained the data for a mathematical theory of electromagnetism, and having shewn how this theory may be applied to the calculation of phenomena, I shall endeavour to place in as clear a light as I can the relations between the mathematical form of this theory and that of the fundamental science of Dynamics, in order that we may be in some degree prepared to determine the kind of dynamical phenomena among which we are to look for illustrations or explanations of the electromagnetic phenomena. In describing the phenomena, I shall select those which most clearly illustrate the fundamental ideas of the theory, omitting others, or reserving them till the reader is more advanced” (MAXWELL, 1873, p. vi).

<sup>33</sup> “The most important aspect of any phenomenon from a mathematical point of view is that of a measurable quantity. I shall therefore consider electrical phenomena chiefly with a view to their measurement, describing the methods of measurement, and defining the standards on which they depend” (MAXWELL, 1873, p. vi).

<sup>34</sup> “The internal relations of the different branches of the science which we have to study are more numerous and complex than those of any other science hitherto developed. Its external relations, on the one hand to dynamics, and on the other to heat, light, chemical action, and the constitution of bodies, seem to indicate the special importance of electrical science as an aid to the interpretation of nature” (MAXWELL, 1873, p. vii).

dinâmica”<sup>35</sup> (MAXWELL, 1873, p. vii), ou seja, seu Tratado é feito assumindo essa “suposição”: caso todo fenômeno deva depender de uma descrição estritamente de ‘corpos em movimento’, sua teoria está adequada a isso. Apesar desse cuidado, seu trabalho marca o início de uma mudança na física, em que o mecanicismo é deixado de lado como fundamento único para a descrição da natureza (BEZERRA, 2006).

Segue afirmando a importância do magnetismo na navegação, a partir do progresso no estudo do magnetismo terrestre e para o telégrafo (HARMAN, 1998, p. 62), novamente afirmando a importância das medições – pois se pode contentar com demonstrações de experimentos em laboratório ou em palestras, mas “para aqueles que precisam encarar quantidades a serem medidas” como os “engenheiros” e “eletricistas avançados” que precisam resolver problemas na vida prática, estes não eram contemplados com a precisão necessária para isso nos compêndios e tratados existentes até então (MAXWELL, 1873, pp. viii-ix).

Atribui ao aprendizado tido com Thomson “grande parte do que [aprendeu] sobre o assunto]”, afirmando a excelência dos trabalhos que o precederam, afirma que, antes de lê-los, dedicou-se ao estudo de *Experimental Researches on Electricity*, de Michael Faraday. A linguagem de Faraday difere em grande medida daquela dos outros autores (continentais, principalmente alemães) que estudaram eletricidade e magnetismo (MAXWELL, 1873, p. ix). A principal diferença consiste em que Faraday, ao contrário daqueles, não concebe o magnetismo como sendo uma ‘ação à distância’, mas “percebia um meio onde os outros não viam nada”. Nesse estudo de Faraday, percebe que, embora não utilize os “símbolos matemáticos na forma tradicional”, seu método é um método matemático (MAXWELL, 1873, p. x).

Por exemplo, Faraday, com o olho de sua mente, viu linhas de força atravessando todo o espaço onde os matemáticos viam centros de força atraindo à distância: Faraday viu um meio onde outros viram nada além de distância: Faraday buscou assentar os fenômenos em ações reais ocorrendo no meio, eles estavam satisfeitos em ter encontrado nele um poder de ação à distância impresso nos fluidos elétricos. Quando traduzi o que considereei serem as ideias de Faraday para a forma matemática, descobri que, em geral, os resultados dos dois métodos coincidiam, de modo que os mesmos fenômenos estavam sendo descritos e as mesmas leis de ação haviam sido deduzidas dos dois métodos, mas que o método de Faraday lembrava aqueles em que começamos com o todo e chegamos às partes por análise, enquanto os métodos matemáticos ordinários estavam fundados no princípio de começar com as partes e construir o todo por síntese<sup>36</sup> (MAXWELL, 1873, pp. x-xi).

<sup>35</sup> “Finally, some progress has been made in the reduction of electromagnetism to a dynamical science, by shewing that no electromagnetic phenomenon is contradictory to the supposition that it depends on purely dynamical action” (MAXWELL, 1873, p. vii).

<sup>36</sup> “For instance, Faraday, in his mind's eye, saw lines of force traversing all space where the mathematicians saw centres of force attracting at a distance: Faraday saw a medium where they saw nothing but distance: Faraday

Sendo as ideias consideravelmente diferentes, mas coincidindo em seus resultados, “muitas das descobertas matemáticas de Laplace, Poisson, Green e Gauss encontram seu lugar apropriado neste tratado e sua expressão adequada nos termos das concepções em grande parte derivadas de Faraday”<sup>37</sup> (MAXWELL, 1873, pág. xi). Outros “matemáticos” que também são reconhecidos por Maxwell em seu prefácio por seus avanços no campo de estudo são Weber, Riemann, Neumann, Lorenz e Gauss, novamente, como defensores da teoria de ação à distância. Seu sucesso concedeu a eles grande autoridade, persuadindo aos “estudantes de eletricidade” que assumissem sua hipótese física de ação à distância, “inteiramente estranha à maneira de ver as coisas” adotada por Maxwell. Seu modo de abordar a eletricidade, entretanto, “não é menos adequado a explicar os fenômenos” enquanto mais uma “maneira de tratar o assunto”. Ainda naquilo que o Tratado não é definitivo, “corresponde [...] mais fielmente ao nosso conhecimento real, tanto naquilo em que afirma, quanto naquilo que deixa indecído”<sup>38</sup> (MAXWELL, 1873, pp. xi-xii).

Tendo sido bem sucedido em calcular a velocidade da luz usando sua teoria, seu papel no Tratado é o de defender seu ponto de vista na comparação entre os dois métodos, e não tenta fazer uma descrição imparcial de ambos (MAXWELL, 1873, pp. xii-xiii). Apesar desse debate, Maxwell não busca descrever, no Tratado, a natureza física do meio que assume como hipótese teórica. “Ative-me quase que inteiramente ao tratamento matemático do assunto” (MAXWELL, 1873, p. xiii). Esse fator é importante se considerarmos que é sua física

---

sought the seat of the phenomena in real actions going on in the medium, they were satisfied that they had found it in a power of action at a distance impressed on the electric fluids.

When I had translated what I considered to be Faraday's ideas into a mathematical form, I found that in general the results of the two methods coincided, so that the same phenomena were accounted for, and the same laws of action deduced by both methods, but that Faraday's methods resembled those in which we begin with the whole and arrive at the parts by analysis, while the ordinary mathematical methods were founded on the principle of beginning with the parts and building up the whole by synthesis” (MAXWELL, 1873, págs. x-xi).

<sup>37</sup> “many of the mathematical discoveries of Laplace, Poisson, Green and Gauss find their proper place in this treatise, and their appropriate expression in terms of conceptions mainly derived from Faraday” (MAXWELL, 1873, p. xi).

<sup>38</sup> “Great progress has been made in electrical science, chiefly in Germany, by cultivators of the theory of action at a distance. The valuable electrical measurements of W. Weber are interpreted by him according to this theory, and the electromagnetic speculation which was originated by Gauss, and carried on by Weber, Riemann, J. and C. Neumann, Lorenz, &c. is founded on the theory of action at a distance, but depending either directly on the relative velocity of the particles, or on the gradual propagation of something, whether potential or force, from the one particle to the other. The great success which these eminent men have attained in the application of mathematics to electrical phenomena gives, as is natural, additional weight to their theoretical speculations, so that those who, as students of electricity, turn to them as the greatest authorities in mathematical electricity, would probably imbibe, along with their mathematical methods, their physical hypotheses.

These physical hypotheses, however, are entirely alien from the way of looking at things which I adopt, and one object which I have in view is that some of those who wish to study electricity may, by reading this treatise, come to see that there is another way of treating the subject, which is no less fitted to explain the phenomena, and which, though in some parts it may appear less definite, corresponds, as I think, more faithfully with our actual knowledge, both in what it affirms and in what it leaves undecided” (MAXWELL, 1873, pp. xi-xii).

matemática, ou seja, o conjunto de equações e métodos de cálculo, o componente que permanecerá de seu trabalho para a posteridade, e não sua hipótese para a descrição da matéria e dos objetos envolvidos em sua teoria. Em outras palavras, o eletromagnetismo de Maxwell é genial e perpétuo em seu tratamento matemático, a despeito de suas hipóteses ontológicas, como o meio propagador chamado de ‘éter’ e os vórtices moleculares cujo movimento é descrito como sendo o que subjaz aos fenômenos do eletromagnetismo. Buscando concentrar seu trabalho sobre os fenômenos conhecidos, não obstante, deixa a teoria em aberto para que fosse desenvolvida conforme novos conhecimentos empíricos se tornassem disponíveis (DARRIGOL, 1993a).

O Tratado é extenso; são dois volumes de cerca de 500 páginas cada um, grande parte do qual dedicado à exposição sistemática dos métodos de cálculo para os fenômenos elétricos e magnéticos. Embora a natureza eletromagnética da luz estivesse estabelecida, não trata desse aspecto em seu trabalho. Calcado grandemente em experimentos, estes dependem de unidades básicas para padrão; trabalho que ainda estava sendo desenvolvido e que Maxwell não vê ser completado em vida, embora tenha se dedicado a realizar experimentos para estabelecimento da unidade de resistência, como já mencionamos (HARMAN, 1998, p. 68).

Teve dificuldades em desenvolver sua teoria eletromagnética da luz, de modo a englobar todos os fenômenos ópticos, como a refração e a reflexão. Entretanto, para ele, existe uma conexão entre o éter e a matéria que faz dos fenômenos da óptica e do eletromagnetismo algo que pode ser explicado em termos de “movimento local” (HARMAN, 1998, p. 167). Toma, por exemplo, a noção de ‘campo’ não como uma representação modelar, mas como objeto do mundo, caracterizando-o como parte de sua ontologia, “o campo já não é mais apenas uma propriedade disposicional (isto é, *se* uma partícula fosse colocada em tal ponto do espaço, *então* ela sentiria tal força), mas sim uma entidade física com existência real” (BEZERRA, 2006).

Logo após a publicação do Tratado, outro experimento de Thomson é anunciado (HARMAN, 1998, p. 68) e Maxwell busca dar continuidade ao trabalho de pesquisa, o que se pode perceber por sua profusa publicação de artigos sobre o assunto na época. Trata-se de um ‘trabalho em andamento’, com hipóteses provisórias e padrões de mensuração ainda por serem estabelecidos. Entretanto, mostrou-se definitivo. Em que medida seu sucesso pode ser atribuído somente ao seu trabalho matemático? Poderia ter alcançado tamanho sucesso em seu empreendimento científico caso não lançasse mão de hipóteses na descrição dos fenômenos? Pensamos que não; a base sobre a qual estabelece sua “física matemática” é a descrição das



hipóteses, e seu sucesso parece estar vinculado ao fato de não ater-se a essas hipóteses, a sabê-las temporárias e, por assim dizer, ‘instrumentais’.

## 2.5 Éter, vórtices, engrenagens, roldanas e forças

Se Maxwell não se ateu às hipóteses teóricas para descrição dos fenômenos no sentido de ‘acreditar’ nelas de modo ‘realista’, não poderia ter aderido à visão de ‘ação à distância’ mais aceita à época e, a partir dela, ter tido o mesmo sucesso em desenvolver sua “física matemática” eficaz na descrição do eletromagnetismo? Evidentemente, fazer conjecturas sobre uma história contrafactual não seria, talvez, o modo mais adequado de abordar nossa pesquisa. Entretanto, algumas características da teoria do eletromagnetismo de Maxwell indicam que a opção por tomar posição e construir sua teoria com hipóteses que não admitiam ação à distância foi crucial para seu sucesso.

Em primeiro lugar, como mostra Harman (1998, p. 87), tanto em *On Faraday's Lines of Force* (MAXWELL, 1855b), quanto no Tratado (MAXWELL, 1873), constrói um modelo geométrico para o fenômeno físico, em vez de fazer uma análise (como menciona em seu prefácio, visto acima). O espaço é preenchido com curvas e é caracterizado por um campo. Numa hipótese de ação à distância, dificilmente se justificaria traçar linhas curvas – seria um salto hipotético grande, sem justificção plausível. Mas o tratamento geométrico é apenas solução para parte do problema, pois conferia direção ao movimento; faltava modo de descrever a intensidade da força eletromagnética. É aí que utiliza a analogia com a dinâmica de fluidos; considerando as linhas como tubos que levam um fluido, pôde tratar os fenômenos tal como se fossem um fluido, embora sem utilizar as equações estabelecidas para aquele campo da física (HARMAN, 1998, pp. 87-88). Essa é apenas uma etapa preliminar à teoria, que permite conferir inteligibilidade ao fenômeno, utilizando uma “analogia física” (HARMAN, 1998, p. 88). Embora para Faraday as linhas de força tivessem existência real, Thomson sugere a Maxwell a utilização da analogia como modo de ‘facilitar’ a construção teórica, ou seja, a analogia teria valor heurístico, não era uma teoria explicatória, ou propedêutica (HARMAN, 1998, p. 98).

Essa teoria é adequada à geometria física em *Physical Lines of Force* (MAXWELL, 1861b), em que as hipóteses explicatórias tomam a forma de complicado sistema de vórtices hexagonais circundados por ‘roldanas’, um construto que servia para demonstrar que uma

“explicação mecânica” era “plausível”, mas, sobretudo, um modelo que permitia um tratamento matemático sólido, calcado nos dados experimentais. Tanto em *Physical Lines* (MAXWELL, 1861b), quanto em *Illustrations of the Dynamical Theory of Gases* (MAXWELL, 1860a), busca uma analogia física, um modelo causal explicativo e o modelo de vórtices, que pode ser identificado com o campo magnético, oferece uma analogia física explicativa que, inclusive, dá conta de explicar o fenômeno de perturbação sobre a luz polarizada causada por um campo magnético (HARMAN, 1998, pág. 99), embora, como já foi apontado antes, não dê conta de explicar todos os fenômenos da óptica com sua teoria eletromagnética da luz (HARMAN, 1998, p. 167).

O desafio de Maxwell era expor uma nova doutrina e, ao mesmo tempo, estabelecer novos padrões para o tratamento de problemas contemporâneos. Para poder dar conta desses dois requisitos conflitantes, a matemática básica e os fundamentos empíricos do tema separou cuidadosamente de teoria mais especulativa<sup>39</sup> (DARRIGOL, 2000, p. 167).

No prefácio ao Tratado (MAXWELL, 1973, p. x), o autor de fato afirma que realizar o programa de Faraday é explicar fenômenos em termos de ações reais acontecendo no meio. Segundo Harman (1998, pp. 101-105), esse modelo de vórtices em forma de dodecaedros confere uma imagem em que o magnetismo ocorre devido à rotação de objetos num meio. Se esses ‘objetos’ são vórtices de moléculas do éter, ou algum outro material, é algo indiferente para a construção do modelo, o fundamental é que seja um modelo que funciona para explicar os fenômenos em termos de movimentos rotatórios, não como explicação definitiva, mas como explicação possível, e que permita a construção de aparelhos experimentais e dá conta de explicar, além dos fenômenos magnéticos, a indução e a corrente elétricas. Trata-se de um modelo mecânico para explicar um problema proposto em termos mecânicos. Enquanto que quando da publicação de *Physical Lines* (MAXWELL, 1860a) ainda não tinha realizado experimentos, esse já não é o caso quando da publicação do Tratado (MAXWELL, 1873), em que descreve diversos aparelhos e experimentos realizados (HARMAN, 1998, pp. 101-105).

Sua proposta de uma teoria física de linhas de força, baseada em especulações sobre ‘vórtices moleculares’ num meio fluido pode ter sido encorajada pelo sucesso de sua

---

<sup>39</sup> “Maxwell’s challenge was to expound a new doctrine and at the same time to establish new standards in the treatment of current problems. In order to meet these two conflicting requirements, he carefully separated the basic mathematical and empirical foundations of the subject from more speculative theory.” (DARRIGOL, 2000, p. 167).

‘analogia física’ de partículas em colisão, ao gerar ‘quantidades “moleculares”’ na teoria dos gases<sup>40</sup> (HARMAN, 1998, p. 101).

Além disso, o modelo mecânico constitui a possibilidade de unificar as diversas instâncias em que um éter era postulado, como na óptica, na teoria do calor, etc. Enquanto que na publicação da Teoria Cinética dos Gases o modelo teórico hipotético apresenta uma discrepância entre a teoria matemática e os dados experimentais de calores específicos, trazendo o problema da justificação para a criação de um “elaborado edifício sobre o qual o argumento teórico se apoia”<sup>41</sup> (HARMAN, 1998, p. 105), a teoria do eletromagnetismo mostra-se muito mais profícua em sua concordância com os dados experimentais, fato que certamente impulsionou Maxwell no sentido de dedicar-se ao desenvolvimento da teoria e a escrever o Tratado do eletromagnetismo. Sua crença numa unidade da natureza que permitiria a analogia física e a consideração dos vórtices moleculares como sendo o mesmo meio em que as forças eletromagnéticas e os fenômenos óticos ocorrem. Permitem a explicação da luz como fenômeno mecânico em termos de movimentos ondulatórios do meio (éter), já que seus cálculos para a velocidade de propagação de ondas naquele meio eletromagnético coincidem com a velocidade calculada experimentalmente. O “modelo desajeitado” de vórtices giratórios em que partículas elétricas perpassam o meio e sujeito a movimentos periódicos ondulatórios é, não obstante, profícuo; uma hipótese inesperadamente produtiva (HARMAN, 1998, pp. 108-114).

Como aponta Darrigol (1993b),

As primeiras noções elétricas do Tratado emergem de uma fenomenologia de experimentos eletrostáticos ao estilo de Faraday. Por exemplo, a eletricidade, seja lá o que for, pode ser transferida e combinada inserindo-se corpos carregados em vasos ociosos condutores e deixando-os tocar as paredes<sup>42</sup> (DARRIGOL, 1993b).

Embora Faraday tomasse essa representação como sendo de fato a constituição da natureza, Maxwell a utiliza de modo a facilitar a compreensão dos fenômenos, sem subscrever à sua ‘realidade’ factual – mantém a postura de fazer uma descrição ‘plausível’ em termos mecânicos, muito mais preocupado em encontrar um tratamento matemático que funcione

---

<sup>40</sup> “His proposal of a physical theory of lines of force, based on speculations about ‘molecular vortices’ in a fluid médium, may have been encouraged by the success of his ‘physical analogy’ of particles in collision, in generating “‘molecular’ quantities’ in the theory of gases” (HARMAN, 1998, p. 101).

<sup>41</sup> “Elaborate edifice on which the theoretical argument rests” (HARMAN, 1998, p. 105).

<sup>42</sup> “The first electric notions of the *Treatise* emerge from a phenomenology of electrostatic experiments in FARADAY’S style. For example, electricity, whatever it is, can be transferred and combined by inserting charged bodies into hollow conducting vessels and having them touch the walls” (DARRIGOL, 1993b).

para estabelecer leis físicas para esses fenômenos, do que em descrever as características intrínsecas da matéria (DARRIGOL, 2000, pp. 157ss). Através dos experimentos, pode concluir que a “eletrificação de um corpo” é uma “quantidade física passível de mensuração” (MAXWELL, 1873, p. 36) além de serem passíveis de adição, podem ser descritos tanto de modo qualitativo, como quantitativo. “A definição resultante da carga elétrica é puramente fenomenológica, independente de qualquer interpretação *substancialística*. Esse ponto é importante para Maxwell, que deseja preservar liberdade total de interpretação”<sup>43</sup> (DARRIGOL, 1993b, grifo nosso). Mais adiante em seu artigo, Darrigol chama atenção para o fato de que, não obstante Maxwell tenha tomado cuidado no uso das palavras para “desencorajar uma interpretação realista demais” para sua apresentação do seu “fluido imaginário” como “mera ilustração entre as principais relações entre deslocamento, carga e corrente”, não foi tão cuidadoso na escolha das palavras, chamando de “eletricidade” tanto o fluido imaginário, quanto a quantidade elétrica fenomenologicamente definida<sup>44</sup> (DARRIGOL, 1993b).

Esse fato parece evidenciar que o autor talvez não tivesse tão claramente diferenciado o modelo da ontologia, embora não se preocupasse em definir esta, ou evitasse fazê-lo. Inaugura um “tipo de reducionismo mecânico moderado, no qual o mecanismo de conexão não mais aparece”<sup>45</sup> (DARRIGOL, 2000, p. 175). O próprio desenvolvimento de sua teoria eletromagnética, nas mudanças que apresenta, marca o início da ‘desmecanização’ da física (BEZERRA, 2006). Como abordar uma teoria que não tem vínculo tão estreito com uma ontologia definida e, ainda assim, ser bem sucedido em seu projeto científico, ou seja, construir teoria capaz de explicações ricas e profundas, com forte capacidade preditiva? Acreditava numa relação de unidade e analogia entre o raciocínio humano e a constituição do mundo, como já mencionamos e como desenvolveremos adiante.

---

<sup>43</sup> “The resulting definition of electric charge is purely phenomenological, independent of any substantialistic interpretation. This point is important to MAXWELL, who wishes to preserve a total freedom of interpretation” (DARRIGOL, 1993b).

<sup>44</sup> O trecho todo é: “MAXWELL introduced his imaginary fluid only as an illustration of the main relations between displacement, charge, and current, and was careful to discourage a too realistic interpretation of it. But he was far less cautious in his choice of words. Rather unfortunately, he called "electricity" both the imaginary fluid and the phenomenologically defined electric quantity; he did not explicitly distinguish between shift and displacement” (DARRIGOL, 1993b).

<sup>45</sup> “he inaugurated a moderate kind of mechanical reductionism, in which the connecting mechanism was no longer exhibited” (DARRIGOL, 2000, p. 175).

### 3 O USO DE METÁFORAS NA CIÊNCIA

Se tomarmos a acepção de ‘metáfora’, como ‘imagem que fazemos do mundo para representá-lo, utilizando outras representações mais conhecidas a nós tendo em vista construir o conhecimento’, então fica evidente que a ciência, como todo e qualquer campo do conhecimento humano, é feito através de metáforas. Entretanto, essa não é a acepção consensual para o termo e a questão de se o uso de metáforas é ou não legítimo na ciência foi motivo de grande debate no último século, se não em toda história das ideias. Evidentemente, o debate gira em torno de uma acepção de ‘metáfora’ como sendo a utilização de representações de modo diferenciado de alguma representação que seria ‘não metafórica’, ou seja, que tivesse alguma relação direta com os ‘objetos do mundo’ que a representação metafórica não teria. Ao mesmo tempo, há que se reconhecer que tomar ‘tudo como metáfora’, ou seja, toda linguagem humana como sendo de conteúdo metafórico, seria eliminar o problema de modo demasiado simplista (ver, por exemplo: HESSE, 1966; LAKOFF, G.; JOHNSON, M., 1980; NERSESSIAN, 2002).

A seguir, faremos um breve levantamento do debate recente para ilustrá-lo, de modo a melhor definir nossa posição diante do exemplo histórico de nossa pesquisa. Acreditamos que, independente desse debate, o modo como Maxwell utilizou a metáfora e seu modo de construir modelos foi, ressaltando-se que o autor segue uma tendência de seus pares, bem como as influências de seu meio, a saber, suas crenças filosóficas e teológicas, um modo inovador e revolucionário, estabelecendo um modo de empreender ciência a partir de então.

#### 3.1 Deus e o mundo

É bastante claro o fato de que Maxwell evitava colocar-se de modo definitivo, deixando sempre margem para futuras “descobertas” e aguardando a confirmação empírica de postulados teóricos antes de outorgar-se fundador de algum posicionamento teórico, ou autor de alguma descoberta. Em outras palavras, o autor tinha uma postura prudente no sentido de afirmar “verdades”, mantendo sempre a possibilidade de correção futura das teorias científicas, tendo como base sólida a experimentação, mantendo um espírito de humildade diante da natureza, com relação à possibilidade do conhecimento humano sobre ela (BRUSH,

2001; STANLEY, 2012). Provavelmente, essa humildade era uma postura de inspiração religiosa, uma vez que, para Maxwell, como mostraremos adiante, a criação divina era de tal natureza que nunca poderemos desvendar totalmente seus mistérios, mas ao mesmo tempo, seria vontade de Deus que buscássemos o conhecimento de sua criação. Ou seja, o empreendimento científico era, para ele, um modo de estar no mundo que cumpria as exigências de sua teologia. Essa prudência com relação ao conteúdo de verdade das teorias científicas fazia com que Maxwell tivesse uma atitude conservadora quanto ao que a ciência pudesse servir de fundamento para a teologia, muito embora, como veremos, servisse à teologia enquanto inspiração (THEERMAN, 1986). A inspiração teológica parece ser elemento crucial não só ao conjunto de seu trabalho científico, como para seu relacionamento social e suas ações pessoais, como sua participação nas discussões e ações políticas da época, guardadas as devidas proporções. O método da analogia, que permeia de um modo ou de outro toda a sua produção científica parece ter como base a visão ontológica de que Deus criou o mundo em unidade e que a semelhança entre todos os elementos do universo permitem sua ligação por analogia, ainda que não seja possível o conhecimento das coisas em si, a analogia existente entre as coisas do mundo permite a exploração científica.

A produção de teorias físicas através do método da analogia parece ser marca comum aos físicos e filósofos naturais da época em que Maxwell está inserido. Norton Wise (1979) faz uma descrição pormenorizada do desenvolvimento das teorias físicas da eletricidade, do magnetismo, da luz e do calor em Maxwell, em especial da transição entre o programa laplaciano de construção de teorias físicas em conformidade com a mecânica newtoniana, onde os fenômenos são explicados como a ação de forças sobre partículas e corpos, ou de seu movimento, e o programa maxwelliano, que embora não dependa de um meio propagador, um éter, dispensa o recurso de “ação à distância” na construção de suas teorias. De fato, Maxwell constrói seu corpo teórico preocupado em não comprometer-se com a ideia de ação à distância. “Analogias”, “modelos físicos” e “imagens visuais”, podem, para Wise, ser todos tratados como “*images*” indiscriminadamente, já que a delimitação entre uma denominação e outra seria tarefa, se não impossível, muito difícil. Não haveria, para esses filósofos naturais, outro modo possível de explicação. As “representações pictóricas de fenômenos naturais que funcionam primariamente como símbolos e possuem, frequentemente, conotações metafóricas”<sup>46</sup> (WISE, 1979). Mais adiante no mesmo artigo, Wise (1979) afirma que “o tipo

---

<sup>46</sup> “Those pictorial representations of natural phenomena which function primarily as symbols and which often have metaphorical connotations” (WISE, 1979).

de redução da mecânica laplaciana não era concebida, por seus defensores, como mero instrumento heurístico que guiava a pesquisa”<sup>47</sup>.

Pode-se resumir o pensamento de Maxwell sobre o método analógico da seguinte maneira. Ele o utiliza por ter uma visão de mundo em que existe uma relação direta, garantida por Deus, entre o pensamento ‘do sujeito’ e o mundo ‘objetivo’. Seu estudo da física é feito utilizando as imagens apresentadas pelos experimentos, pois embora considere o cultivo dos estudos teóricos via para elevação da alma, ou seja, a abstração da matemática é um modo que o homem tem de se distanciar do mundo carnal; Maxwell também considera a observação do mundo como forma de acessar a criação divina, daí a utilização de experimentos. Esse “acesso” à natureza não é dado de modo dogmático, mas construído com base na visão de que as teorias científicas deverão ser sempre revistas. A criação divina nunca poderá ser conhecida por completo, mas é vontade de Deus que continuamente busquemos seu conhecimento, para isso nos concedeu a faculdade da razão e a possibilidade de obter conhecimento científico. É o experimento que traz do mundo os dados que corroboram as teorias. A possibilidade de relacionamento entre a teoria abstrata e a configuração do mundo, em Maxwell, é estabelecida devido à relação direta, analógica, entre o mundo e o pensamento humano. Essa relação não pode ser estudada ou compreendida, é garantida por Deus e é uma relação cuja verdade se estabelece por não haver alternativa de concepção. A unidade estabelecida por Deus ao mundo permite a inferência de que as leis da física deverão ser unas, deverão ter características que as unifiquem. Essa inspiração faz Maxwell investigar as analogias entre ramos da física estabelecidos de modo distinto, unificando-os num corpo teórico consistente e produtivo. A ciência mostra o mundo em evolução e decaimento, mas mostra também elementos fixos e imutáveis na natureza, que é de característica mutante, mas seus elementos fixos são o sinal de que existe um elemento artificial, para Maxwell, necessariamente obra de criação divina. Embora a ciência não possa fundamentar a religião, nem a religião influenciar a ciência, ambas são mutuamente inspiradoras e corroboram-se. O ser humano nunca atingirá o conhecimento total e pleno, nem tampouco aquele das essências das coisas, mas tem a tarefa de sempre ir adiante à busca do conhecimento sobre o mundo, tarefa que, por si só, possui a característica de fazer a alma elevar-se.

Peter Harman (1998, pp. 74ss) faz alusão à ideia de que talvez houvesse influência de Kant sobre Maxwell, mas afirma ser difícil estabelecer esse tipo de influências filosóficas e opta por analisar os escritos do autor. Sua análise mostra que, embora Hamilton, que lecionou

---

<sup>47</sup> “Laplacian type of mechanical reduction was not conceived by its supporters as merely a heuristic device to guide research” (WISE, 1979).

filosofia para Maxwell em Edingburgh, tivesse predileção por Kant em relação a Hume, é muito mais provável que as influências filosóficas de Maxwell sejam diretamente de Whewell e de outros filósofos escoceses, como Thomas Reid, Dugald Stewart e Thomas Brown, a escola de filosofia escocesa do senso comum. Esses filósofos buscavam combater o ceticismo de Hume, julgado como “destrutivo da virtude moral” e, ao limite, “levando ao ateísmo”. Os filósofos escoceses apresentam a ideia de que o conhecimento se dá muito mais sobre as relações entre os entes, do que sobre sua essência, “o conhecimento é analógico e relacional”, ideia que parece ter clara ressonância nos textos de Maxwell, como veremos mais adiante (HARMAN, 1998, p. 31; STANLEY, 2012).

O físico estaria familiarizado com o pensamento de Whewell já que, ao falhar em seu primeiro exame para o Trinity College, que incluía no currículo de metafísica as obras do filósofo, professor na instituição, foi finalmente aprovado em 1855 e, portanto, será natural considerar que ele estivesse familiarizado com Whewell após essa data. De fato, Whewell ressalta o relacionamento entre cognição e realidade, sendo uma parte central de seu pensamento a “tese de inspiração kantiana” de que “a ciência forma um sistema abrangente de leis que, enquanto são baseadas no trabalho experimental, também são universais e necessárias” (HARMAN, 1998, p. 32), Maxwell usa a expressão de Whewell no seu texto sobre as analogias quando afirma uma “analogia *real* entre a constituição do intelecto e aquela do mundo exterior”<sup>48</sup> (MAXWELL, 1856a, grifo no original). O argumento é de evidente inspiração kantiana, mas não se trata do argumento kantiano. Whewell defende que a geometria é um exemplo de como não há maneira de conceber de modo diferente, por exemplo, um espaço quadridimensional, fato que demonstraria a necessidade da geometria (STANLEY, 2012).

O mundo possui unidade intrínseca, ou seja, segundo a metáfora de Maxwell (1860a), de modo diferente de uma revista semanal, em que cada parte não tem relação com as demais. Em vez disso, a natureza é como um livro, em que cada capítulo está ligado aos demais, “seus elementos individuais devem ser vistos como manifestações de princípios unificados mais profundos” (STANLEY, 2012). As leis da natureza são “mensageiros divinos” e a física revela um mundo em que a sabedoria divina é expressa (MAXWELL, 1855a). Uma distribuição ao acaso, em que os elementos da natureza não tivessem relação uns com os outros, não seria provável e, portanto, a unidade seria manifestação do plano divino. Além disso, há uma unidade entre a natureza e o intelecto humano, de modo que o pensamento

---

<sup>48</sup> “Here, therefore, we have a *real* analogy between the constitution of the intellect and that of the external world” (MAXWELL, 1856a, grifo no original).



humano ocorre de modo analógico aos fenômenos do mundo. Segundo esse pensamento teológico, faz parte do plano divino que o ser humano estude e conheça a natureza, até o limite que lhe é dado, como um modo de aproximar-se de Deus (STANLEY, 2012).

Embora Maxwell alinhe-se com uma visão evangélica da teologia, ele o faz de modo diferente daqueles que defendem, em sua época, que a evidência da existência de um criador seria o fato de que o mundo apresenta-se como criação, ou seja, seria a complexidade do mundo que mostraria a evidência de que foi “projetado”, criado. Essa era a teologia de William Paley, por exemplo, defensor da teologia que pregava o desenho inteligente, avessa ao desenvolvimento da ciência. Para Maxwell, era a unidade do mundo que demonstrava a existência e ação de Deus. Em vez de ver o “desenho” divino como algo oposto ao empirismo e à ciência, em que a complexidade e nossa incompreensão do mundo seriam indicadores de sua existência, Maxwell o toma como uma indicação da necessidade da descoberta científica como forma de aproximação ao divino. Essa harmonização entre ciência e religião não é dependente de passagens bíblicas, embora fosse intenso estudioso dos textos religiosos, mas baseia-se em “verdades teológicas amplas” e “diretrizes científicas amplas” (STANLEY, 2012).

Paul Theerman (1986) e Matthew Stanley (2012) descrevem o percurso religioso de James Clerk Maxwell. Pode-se dizer que Maxwell estava “no meio” das discussões teológicas de seu tempo, tanto no sentido de que essas discussões ocorriam no círculo intelectual que frequentava, quanto no sentido de que o seu posicionamento era de moderação entre os extremos. Ambos deixam clara a relação próxima entre as convicções teológicas do filósofo natural e sua metodologia científica.

Após uma experiência marcante de natureza mística, Maxwell converte-se de anglicano e presbiteriano convicto, mas “burocrático”, a evangélico ardoroso. De tal forma ardoroso que é aconselhado por um reverendo a que buscasse moderação. A experiência de conversão ocorreu quando Maxwell, enfraquecido pelos esforços de preparar-se para o rigoroso exame Tripos, em Cambridge, fica doente enquanto está hospedado na casa da família do reverendo Tayler. Através de Tayler, Maxwell tem contato com a primeira influência teológica de sua conversão; as ideias do teólogo Butler que atribuíam ao corpo um mal inerente cuja redenção estaria na elevação da alma. Segundo esse pensamento teológico, muito influente em Cambridge na época, o estudo da matemática era uma via de elevação da alma no sentido de “espiritualização do corpo” (THEERMAN, 1986; HARMAN, 1998; LAMBERT, 2010; STANLEY, 2012).

Em 1858 casa-se com Mary Dewar, filha do reitor de Marischal. Seu casamento é fonte de inspiração devocional, visto a troca de correspondência do casal em torno de assuntos e discussões teológicas. Suas ardorosas convicções se mantêm constantes ao longo de toda a vida e são reforçadas e reiteradas por dois fatores cruciais. O primeiro é seu casamento com Katherine Dewar: seu relacionamento com sua esposa tem a característica de troca de pensamentos e passagens religiosas. O segundo é a sua entrada, logo após a experiência de conversão, na sociedade dos “Apóstolos”. Esse grupo é uma associação de doze pessoas com o intuito de realizar discussões gerais, mas de interesse religioso cristão. As reuniões do grupo eram regulares e tinham o papel de possibilitarem um ‘descanso’ aos assuntos da vida acadêmica, proporcionando um ambiente sem hierarquia, onde o livre pensamento era cultivado (THEERMAN, 1986; HARMAN, 1998; LAMBERT, 2010; STANLEY, 2012).

A cristandade evangélica era uma força maior no pensamento e na sociedade vitorianas. Não se tratava de uma seita em separado, mas um movimento que abarcava diversas denominações para reconceituar o relacionamento entre Deus e o homem através da reflexão e da ação individuais. Esta era uma ‘religião do coração’, com ênfase na conversão, no pecado e na Graça, afastando-se do racionalismo do Iluminismo, numa tentativa de ressurreição da Igreja perdida, primitiva, não contaminada pelas falhas humanas. Na estrutura evangélica, o homem era naturalmente depravado pelo pecado original e era inteiramente outro com relação ao divino. A vida era a oportunidade para o indivíduo de provar sua moralidade através do exercício da livre vontade em escolher uma vida divina em lugar de uma vida mundana (STANLEY, 2012)<sup>49</sup>.

E um dos caminhos para essa vida “divina” e para o afastamento da vida mundana é, justamente, o estudo abstrato que a matemática propicia, como mostra a ênfase em seu estudo para a época vitoriana, e, além disso, para Maxwell, o estudo da ciência (LAMBERT, 2010; STANLEY, 2012). Seria esperado de um estudioso bíblico, como foi Maxwell, uma atitude anticientífica, mas não foi o caso. E isso também não parece ter sido o caso no tempo de Maxwell e não é o que ocorreu com o seu posicionamento diante do tema. Pelo contrário, utilizou suas fortes convicções religiosas como inspiração para seu trabalho científico, em que defende uma “teologia da natureza”.

---

<sup>49</sup> “Evangelical Christianity was a major force in Victorian thought and society. It was not a separate sect, but rather a cross-denominational movement to reconceptualize the relationship of God and man through individual reflection and action. This was a ‘religion of the heart’, with an emphasis on conversion, sin and Grace, and moving away from the rationalism of the Enlightenment in an attempt to resurrect the lost, primitive Church uncontaminated by human failings. In the evangelical framework man was naturally depraved via original sin and was wholly other from the divine. Life was the opportunity to prove one’s morality through the exercise of free will to choose a godly life over a worldly one” (STANLEY, 2012).

Uma perspectiva religiosa era necessária para interpretar adequadamente a desordem do mundo, do mesmo modo que uma perspectiva religiosa era necessária para interpretar o comportamento pecador do ser humano individual<sup>50</sup> (STANLEY, 2012).

A busca de revelar o desconhecido e misterioso que há na natureza é, enfim, uma busca de caráter religioso e Deus teria “desenhado” o mundo de modo a garantir que sempre haverá mistérios a serem desvendados pelo ser humano (STANLEY, 2012).

Maxwell via importante significado num universo onde as leis da natureza se encaixavam bem como pedaços de um quebra-cabeças. Nessas ligações, via a existência e a bondade de Deus, o mistério do divino, a humildade do homem e a aprovação da ciência – como Projeto Cristão<sup>51</sup> (STANLEY, 2012).

A validação do empreendimento científico como tarefa “cristã” parece ser crucial para Maxwell. Sua crença religiosa é intensa e seu envolvimento com discussões teológicas é profundo durante toda sua vida. No meio das discussões de seu tempo, essa validação tem o papel de justificar toda a sua vocação científica e isso o coloca do lado “da ciência” num debate ferrenho que se inicia em seu tempo entre uma leitura “literalista” da bíblia e a posição de que o exercício da ciência não só não é incompatível com a crença religiosa, mas é respaldada e estimulada por esta.

Os argumentos em favor do “desenho inteligente” não eram favoráveis ao desenvolvimento da ciência, uma vez que defendiam que não haveria modo do ser humano alcançar a compreensão da criação divina, pois a complexidade do mundo representava “barreiras intransponíveis” por sua “complexidade irreduzível”. Ao contrário, Maxwell defendia que o “desenho” divino era tal que Deus teria dado ao homem a capacidade de desvendar os mistérios da natureza e, ainda mais, era parte do plano de Deus que assim o fizesse (STANLEY, 2012). Além disso, observando o conjunto da obra de Maxwell, fica claro como percebe a complexidade como característica da natureza, mas não por isso seria barreira intransponível, afinal, ele pode tratar matematicamente dessa complexidade.

A busca de elevação espiritual era uma preocupação central para Maxwell, que encontrava, no estudo da ciência e da matemática o meio para essa elevação. Essa convicção dava-se não só através da participação na sociedade dos “Apóstolos”, como também em sua

---

<sup>50</sup> “A religious perspective was seen as necessary to properly interpret the world’s disorder, just as a religious perspective was necessary to properly interpret individual human sinful behaviour” (STANLEY, 2012).

<sup>51</sup> “Maxwell saw tremendous significance in a universe where the laws of nature fit together like pieces of a puzzle. In those links he saw the existence and goodness of God, the mystery of the divine, the humility of man, and the approval of science – as a Christian Project” (STANLEY, 2012).

participação em outra sociedade de Cambridge, de cultivo do estudo da matemática e que girava em torno do *Cambridge and Dublin Mathematical Journal*. O objetivo expresso dessa associação era o cultivo do estudo da matemática como meio de “elevação da alma” para longe da malignidade do corpo (LAMBERT, 2010; STANLEY, 2012).

Na época da entrada de Maxwell aos Apóstolos, a participação de Frederick Maurice, que havia publicado um trabalho teológico controverso, exercia forte influência sobre o grupo. Ele propunha uma teologia concebida como o que se pode chamar de “socialismo cristão moderado” e que se opunha a uma visão teológica que se pode chamar de “utilitarismo”. Por influência das ideias de Maurice, e de sua participação direta no grupo, os Apóstolos estavam do *Working Men’s College*, que oferecia aos trabalhadores aulas com currículo que imitava aquele de Cambridge e Oxford. Esse movimento visava possibilitar acesso dos trabalhadores ao conhecimento reservado à elite aristocrática, já que as escolas para proletários não tinham o currículo da elite, sendo limitadas simplesmente à alfabetização e à aritmética básica. Maxwell foi docente dedicado nesse empreendimento educacional e chegou a entusiasmar-se de modo bastante político como a escola para trabalhadores, aludindo em correspondência a manifestações em favor da redução da jornada de trabalho, (THEERMAN, 1986; LAMBERT, 2010; STANLEY, 2012).

Desde o início do século, as discussões teológicas em Cambridge giravam em torno do que Lambert chama de “teologia da redenção” (*atonement theology*), com Thomas Birks como um de seus expoentes. Birks publica, em 1833, um texto chamado *The analogy between mathematical and moral certainty* (A analogia entre a certeza matemática e a certeza moral) que teria impressionado Maxwell. Whewell, que foi seu professor, também subscrevia a essa teologia (HARMAN, 1998, pp. 28-29). As controvérsias teológicas entre Birks e Maurice, teólogo progressista que pregava uma interpretação mais livre das escrituras, influenciaram Maxwell no seu uso de analogias. Essas visões teológicas estariam sendo revisadas, pois, quando antes significavam uma postura mais conservadora, agora tinham conotações de uma prática que visava “criar o Reino de Deus na terra” através do estímulo e da ênfase nos estudos para a elevação do espírito. Esse era o objetivo do empreendimento do *Working Men’s College*, numa expressão clara de uma espécie inicial de “socialismo cristão” (THEERMAN, 1986; LAMBERT, 2010; STANLEY, 2012).

Poderia ser dito que seria esperado encontrar, nos escritos e pronunciamentos públicos de qualquer cientista, uma apologia da ciência enquanto atividade produtora de bens morais devido ao seu exercício. Entretanto, o que foi visto acima indica que a apologia à atividade, não só da ciência, mas do conhecimento em geral é fator importante na produção de virtude

moral. De fato, encontramos a alusão à importância da prática científica como elemento de elevação espiritual em diversas passagens de Maxwell. Essa validação dos estudos e do conhecimento está profundamente enraizada em sua teologia, sendo mais que apenas a apologia à ciência, era um de seus modos de professar sua fé.

Vemos como essa posição teológica não só estabelece seu relacionamento pessoal com o mundo, mas determina seu modo de perceber a realidade e inspira seu trabalho científico. Como já ressaltamos, para Maxwell, o fato de que o mundo está unificado por Deus permite o tratamento das teorias da física através do uso de analogias. Essas analogias se dão em diversos níveis: são analogias matemáticas, analogias pictóricas (esquemas e modelos desenhados), analogias ontológicas (metáforas que permitem ‘visualizar’ elementos não perceptíveis das teorias).

### **3.2 Experimentos elétricos**

Além das discussões teológicas, havia, ainda, uma discussão importante que ocorria em torno do estatuto das artes práticas no interior da ciência. A ciência de elite era composta por um grupo, o “professorado”, com acesso a recursos e laboratórios bem montados e que tinha como preceito a ideia de que as verdades viriam do pensamento teórico abstrato. Os experimentos seriam cruciais na prática científica, mas não estariam no centro de sua atividade. Por outro lado, havia os cientistas da eletricidade, os “eletricistas” que provinham de classe menos abastada. Recorrendo aos recursos que tinham, a principal atividade desses eletricistas era produzir experimentos práticos para apresentar em palestras públicas, voltadas para a divulgação científica (MORUS, 1993).

Enquanto o laboratório aristocrático era de uso exclusivo do cientista de elite, muitas vezes literalmente, pois ninguém além do cientista teria acesso a ele, os eletricistas reuniram-se numa sociedade para partilhar entre si suas descobertas, principalmente às relacionadas à técnica de produção de experimentos de caráter didático. Técnica e ciência misturam-se na prática dos eletricistas. Além de “teatros para palestras” e alguns periódicos, havia uma sociedade, a *London Electrical Society*, publicado entre 1836 e 1843 e com ênfase na produção de experimentos práticos, econômicos e simples. O relacionamento de Faraday a essa sociedade, não se deu por sua participação nela, mas por ser inspirador de seus

participantes e por valorizar e elogiar seu trabalho, embora essa associação fosse custosa à reputação do físico (MORUS, 1993).

Faraday, enquanto filósofo natural desenvolveu sua pesquisa do magnetismo recorrendo principalmente ao experimento prático como fonte de dados. Essa postura foi criticada por diversos de seus contemporâneos, que privilegiavam o tratamento teórico abstrato como tendo mais valor do que o empírico. Sua teoria baseava-se nas “figuras” formadas pela serralha de ferro sobre folha de papel que cobria um ímã. Sem desenvolver cálculos matemáticos abstratos, Faraday utiliza as linhas formadas no experimento como base para sua teoria. Por essa razão, é invalidado e criticado. Ao buscar desenvolver a teoria do eletromagnetismo a partir do trabalho anterior de Faraday, tanto Thomson, quanto Maxwell, tinham que fazer com que a influência dos eletricitistas práticos sobre o trabalho de Faraday se tornasse “invisível”, pois o relacionamento com uma prática científica voltada ao experimento não seria bem vista no círculo do “professorado” (MORUS, 1993). Entretanto, Maxwell parece adotar essa característica “teatral” do experimento advinda dos eletricitistas populares, como mostra seu texto *The Theory of Molecules* (MAXWELL, 1874) em que, ao longo do texto, descreve diversos experimentos em primeira pessoa, indicando estar apresentando esses experimentos durante sua palestra. Defende o uso da experimentação, realizando ‘divulgação científica’. Isso mostra que estabelece uma mudança de postura diante do experimento e da observação empírica. Se é através do estudo matemático teórico que se eleva a alma, é observando a natureza que se pode conhecer a criação divina (THEERMAN, 1986; MORUS, 1993; HARMAN, 1998; LAMBERT, 2010; STANLEY, 2012).

Ainda outra influência teológica sobre Maxwell teria sido a de Richard Litchfield, seu colega em Cambridge, que seria genro de Charles Darwin a partir de 1864 e um dos fundadores, com Maurice, do *Working Men’s College*, Litchfield fazia a afirmação corrente no meio protestante de que a ciência era uma defesa contra argumentos ilegítimos da autoridade, mas ia além, dizendo que a ciência, em vez de “entorpecer” “promovia a poesia e a reverência” (THEERMAN, 1986).

A prática material tinha, no século dezanove, associações políticas com o mecânico e o artesão, enquanto as verdades matemáticas de Cambridge carregavam profundo significado religioso. Esse significado tinha implicação para os tipos de material e de práticas teóricas que um filósofo natural do início do século dezanove poderia empregar. [...] Enquanto a analogia que Birks faz entre o raciocínio geométrico e a moralidade absoluta

distancia a verdade moral da experiência da realidade material, Maurice as aproxima<sup>52</sup> (LAMBERT, 2010).

No interior dos questionamentos à teologia aberta a questionamentos de Maurice, encontra inspiração que permite a incorporação dos aspectos ‘mundanos’ dos experimentos à construção da prática científica. Existe abertura para a relação direta entre a natureza e o intelecto, uma ontologia que fazia a analogia entre pensamento e matéria. Essa revisão inspira Maxwell a utilizar a analogia em sua operação de construções matemáticas e modelos imagéticos retirados diretamente dos experimentos práticos de Faraday (THEERMAN, 1986; LAMBERT, 2010; STANLEY, 2012).

Entretanto, para Maxwell, a percepção era algo singular a cada pessoa, literalmente, pois seus experimentos com cores, como vimos acima, mostram isso. É, portanto, um processo não passível de especulação racional, não havendo qualquer noção de conexão entre os objetos e as ideias, exceto a conexão realizada por Deus, que teria dado ao homem os meios de levar adiante o seu dever de conhecer a natureza.

As leis fundamentais da física tinham a característica de ser racionalmente verdadeiras, ou seja, não poderiam ser de outro modo. [...] Parte do penetrante uso [que Maxwell faz] das analogias na física foram para mostrar como experimento e teoria podiam apoiar-se mutuamente, ou seja, como o experimento podia esclarecer ideias teóricas e como as teorias podiam sugerir experimentos<sup>53</sup> (THEERMAN, 1986).

E em outra passagem:

Embora a conexão entre o mundo da natureza e o mundo do pensamento necessite ser sempre obscura, pode-se *demonstrar* as diversas maneiras com que o mundo da natureza e o mundo do pensamento estão em consonância<sup>54</sup> (THEERMAN, 1986, grifo no original).

---

<sup>52</sup> “Early nineteenth-century material practice had political associations with the mechanic and the artisan, while the truth of Cambridge mathematics carried deep religious significance. Those meanings had implications for the kinds of material and theoretical practices a natural philosopher of the early nineteenth century could employ. [...] While Birks’s careful analogy between geometrical reasoning and absolute morality distanced moral truth from the experience of material reality, Maurice brought them closer together” (LAMBERT, 2010).

<sup>53</sup> “The fundamental laws of physics were rationally true, that is, they could not be otherwise [...]. Part of his pervasive use of analogies in physics was to show how experiment and theory could be mutually supporting, i.e., how experiment could clarify theoretical ideas and how theories could suggest experiments” (THEERMAN, 1986).

<sup>54</sup> “[Nonetheless,] although the *basis* of the connection between the world of nature and the world of thought must always be obscure on this view, one could *demonstrate* the various ways that the world of nature and the world of thought were in consonance” (THEERMAN, 1986).

As referências de Maxwell às questões religiosas não são diretas em seus textos científicos, exceto em sua discussão sobre os átomos (MAXWELL, 1875) e em seu artigo sobre as moléculas (MAXWELL, 1874), que examinaremos em seguida.

### 3.3 A constituição do mundo: moléculas

Em *The Theory of Molecules* (MAXWELL, 1874), palestra apresentada pelo autor para a British Association em Bradford e publicada na revista *Popular Science* em janeiro de 1874, ao final de sua vida, Maxwell esclarece diversos pontos de sua visão sobre a constituição do mundo. Sua produção intelectual é inspirada por uma crença forte na unidade da natureza e, em razão disso, na possibilidade de unidade do saber, uma crença de que a ciência caminha em direção a um conjunto unitário de teorias que explicam a natureza, ela mesma caracterizada pela unidade.

Inicia sua exposição descrevendo a aceção de átomo para os gregos antigos. O atomismo foi escola importante na antiguidade e a discussão entre o atomismo de Lucrécio, Epicuro e Demócrito e a doutrina da homogeneidade do mundo, em que a matéria seria divisível indefinidamente, com as partes tendo semelhança direta com o todo, defendida por Anaxágoras é descrita por Maxwell. Essa passagem inicial demonstra um rompimento com a dicotomia platonismo/escolástica, dominantes na história da filosofia em todas as suas épocas. Maxwell subscreve à doutrina atomística e esclarece que a noção de molécula não tem origem na Grécia antiga, mas é bem recente. Diz o autor: “De acordo com a doutrina recebida, em cada molécula de água existem duas moléculas de hidrogênio e uma de oxigênio”<sup>55</sup> (MAXWELL, 1874). Em sua aceção, uma molécula é um corpo pequeno que, unido a outros idênticos, forma determinada substância. Cada substância teria sua molécula. Essas moléculas podem ser simples ou compostas, sendo que os átomos, ‘se tal coisa existir’, precisam ser moléculas de sua substância elementar.

Não é sobre as especificidades da química moderna que Maxwell se propõe falar, mas sobre seu aspecto geral, sua universalidade. O interesse por questões como essa não se deve à especialidade do cientista, mas é atribuída ao humano, pois “todos nós pertencemos a uma raça dotada de capacidades que nos incitam a buscar cada vez mais profundamente a natureza

---

<sup>55</sup> “According to the received doctrine, in each molecule of water there are two molecules of hydrogen and one of oxygen” (MAXWELL, 1874).



das coisas”<sup>56</sup> (MAXWELL, 1874). Embora a tentativa de enxergar o muito pequeno esteja além dos limites humanos, a questão sempre ressurgem geração após geração. O objetivo da palestra de Maxwell é descrever as pesquisas na ciência das moléculas e apresentar “informações definidas que já tenham sido obtidas sobre as moléculas”<sup>57</sup>.

Inicia a explicação da teoria de que as moléculas estão em movimento, o que é afirmado por certos gregos antigos e é retomado em sua época, quando, através de experimentos, provou-se o movimento das moléculas. Parece ser importante, aqui, a afirmação do autor de que a teoria que descreve substâncias como formadas por moléculas e que elas estão em movimento seja uma teoria “sujeita a experimentação”<sup>58</sup>.

É clara a importância dada por Maxwell ao método científico. O papel da matemática e do experimento são fundamentais para o autor, que, segundo Brush (2001), toma todo cuidado com relação à conformidade das teorias com os experimentos, ainda que isso significasse a perda do crédito por suas descobertas. Para Brush, não se tratava de não ser competitivo, mas “seu medo de, posteriormente, fosse descoberto que estavam errados superava o medo de serem deixados para trás”<sup>59</sup> (BRUSH, 2001). Entretanto, como conciliar a percepção de que o cientista é cauteloso e meticuloso no seu uso do método com o emprego da analogia enquanto peça fundamental do seu processo de descoberta e de explicação científica? Embora a analogia matemática, geométrica, tenha valor exato, o uso de metáforas não é aceito como integrante do método científico.

Em *The Molecules* (MAXWELL, 1874), como também no verbete *Atom* (MAXWELL, 1875), para a *Encyclopedia Britannica*, Maxwell desenvolve o argumento de que, se por um lado a natureza é caracterizada pela evolução e pelo decaimento, ou seja, pela constante mudança, os átomos demonstram ser imutáveis e permanentes, além de apresentarem-se sempre constantes independente do local do universo onde se encontrem. O momento é o da realização de diversos experimentos que estabelecem dados com relação ao estudo dos átomos e das moléculas, como a medição por espectroscópio do comprimento de onda da luz oriunda de substâncias em situações diversas, incluindo estratos geológicos de diferentes eras, em meteoritos e do espectro de estrelas distantes.

---

<sup>56</sup> “we all belong to a race endowed with faculties which urge us on to search deep and ever deeper into the nature of things” (MAXWELL, 1874).

<sup>57</sup> “definite information which has been obtained respecting the molecules themselves” (MAXWELL, 1874).

<sup>58</sup> “subjected to experiment” (MAXWELL, 1874).

<sup>59</sup> “their fear of being later found to have made a crucial mistake outweighed their fear of being scooped” (BRUSH, 2001).

Mas quando passamos para a contemplação de nossos experimentos para aquela das moléculas em si mesmas, deixamos o mundo do acaso e da mudança e entramos numa região onde cada coisa é certa e imutável.

As moléculas têm conformidade a um tipo constante, numa precisão que não pode ser encontrada nas propriedades sensíveis dos corpos que elas constituem. Em primeiro lugar, a massa de cada molécula individual e todas suas outras propriedades, são absolutamente inalteráveis. Em segundo lugar, as propriedades de todas as moléculas de um mesmo tipo são absolutamente idênticas. (...)

Através do espectroscópio de comprimentos de onda de diferentes tipos de luz podemos computar até a décima-milésima parte. Dessa forma, foi afirmado não só que as moléculas tiradas de cada amostra de hidrogênio em nossos laboratórios têm o mesmo período de vibração, mas que a luz, tendo os mesmos períodos de vibração, é emitida do sol e das estrelas fixas.

Somos, portanto, assegurados de que moléculas de mesma natureza que aquelas do nosso hidrogênio existem nessas regiões distantes ou, pelo menos, existiram quando a luz que vemos delas foi emitida<sup>60</sup> (MAXWELL, 1874).

Essa permanência que caracteriza os átomos é, para Maxwell, prova de que são objetos “artificiais”, que não podem ter uma origem “natural”, sendo, portanto, necessariamente obra de criação divina.

A ciência é incompetente para raciocinar sobre a criação da matéria em si mesma a partir do nada. Atingimos o último limite de nossas faculdades racionais quando admitimos que, como a matéria não pode ser eterna e autoexistente, ela precisa ter sido criada. (...)

Continuam até hoje do mesmo modo que foram criadas, perfeitas em número e em medida, em peso e, pelas características indeléveis imprimidas a elas, podemos aprender que essas aspirações, após precisão na medição, verdade na afirmação e justiça na ação, que reconhecemos como entre os atributos mais nobres do homem, são nossas, pois são constituintes essenciais da imagem Dele que no início criou, não somente o céu e a terra, mas os materiais dos quais o céu e a terra consistem<sup>61</sup> (MAXWELL, 1874).

<sup>60</sup> “But, when we pass from the contemplation of our experiments to that of the molecules themselves, we leave the world of chance and change, and enter a region where every thing is certain and immutable.

The molecules are conformed to a constant type with a precision which is not to be found in the sensible properties of the bodies which they constitute. In the first place, the mass of each individual molecule, and all its other properties, are absolutely unalterable. In the second place, the properties of all molecules of the same kind are absolutely identical. (...)

By means of the spectroscope the wave-lengths of different kinds of light may be computed to within one ten-thousandth part. In this way it has been ascertained, not only that molecules taken from every specimen of hydrogen in our laboratories have the same set of periods of vibration, but that light, having the same set of periods of vibration, is emitted from the sun and from the fixed stars.

We are thus assured that molecules of the same nature as those of our hydrogen exist in those distant regions, or at least did exist when the light by which we see them was emitted” (MAXWELL, 1874).

<sup>61</sup> “Science is incompetent to reason upon the creation of matter itself out of nothing. We have reached the utmost limit of our thinking faculties when we have admitted that because matter cannot be eternal and self-existent it must have been created. (...)

They continue this day as they were created, perfect in number, and measure, and weight, and, from the ineffaceable characters impressed on them, we may learn that those aspirations after accuracy in measurement, truth in statement, and justice in action, which we reckon among our noblest attributes as men, are ours, because they are essential constituents of the image of Him who in the beginning created, not only the heaven and the earth, but the materials of which heaven and earth consist” (MAXWELL, 1874).

Note-se a alusão à teoria darwiniana da evolução, corroborando a ideia de que essa teologia à qual subscreve Maxwell coloca-se de modo a apoiar toda a produção científica, sem negá-la, buscando nela inspiração para fortalecer-se. Essas características da teologia esclarecem os fundamentos a partir dos quais Maxwell utiliza as analogias e possibilitam sua prática em que inaugura uma nova metodologia científica baseada em modelos (HON; GOLDSTEIN, 2012).

No texto, Maxwell apresenta uma teoria dinâmica para os gases. Construindo sobre as descobertas dos físicos anteriores a ele, descreve as interações constantes que envolvem as alterações de volume, temperatura e pressão nos gases. Apresenta valores matemáticos exatos, como o peso de um centímetro cúbico de hidrogênio (0,00008954 gramas) a zero grau Celsius e à pressão de uma atmosfera, bem como a velocidade que as moléculas de hidrogênio devem ter nessas condições (1.859 metros por segundo), sendo este só um exemplo dado no meio da dissertação, pois a palestra é acompanhada de uma tabela com os valores calculados para massas, diâmetros, números de colisões por segundo, velocidades de difusão de temperatura, matéria e momento, calculados pelos diversos físicos que estudaram o tema dos gases. Essa tabela está à mostra afixada na parede ao longo da palestra (MAXWELL, 1874).

Maxwell passa a explicar que o ar da sala, embora seja composto de moléculas a altas velocidades, essas velocidades não se traduzem num vento de mesma velocidade, que não seria suportável pelas pessoas da sala, devido ao fato de que as moléculas viajam em todas as direções, mas que o somatório dessas moléculas em alta velocidade forma a pressão, que permite a sobrevivência das pessoas na sala sem que inchassem até morrer. Viajando em todas as direções, não é difícil conceber, diz o autor, que essas moléculas colidam umas com as outras. É esse movimento ‘caótico’ que a teoria das moléculas propõe explicar e quantificar; as moléculas não são observáveis individualmente, suas trajetórias individuais não podem ser determinadas, mas o conjunto das moléculas se comporta de modo previsível segundo determinadas leis, esse conjunto é observável e quantificável (MAXWELL, 1874).

Segundo Harman (1982, p. 87), é “a crescente aplicação da análise matemática a problemas físicos, facilitada pelo domínio de Stokes, Thomson e Maxwell que dão à física britânica sua característica matemática distintiva”<sup>62</sup>, pois embora houvesse grande ênfase no estudo da matemática em Cambridge, não havia muitas publicações e, no caso da física

---

<sup>62</sup> “The increasing application of mathematical analysis to physical problems was facilitated by the dominance of Stokes, Thomson, and Maxwell, who gave British physics its distinctive mathematical character” (HARMAN, 1982, p. 87).

teórica, havia muito poucas cadeiras nas universidades britânicas. Na segunda metade do século XIX, a maior parte das cadeiras de física teórica é ocupada por professores oriundos de Cambridge, onde Maxwell teve sua formação. A abordagem matemática de Cambridge, entretanto, e que é seguida por Maxwell, não é de característica cartesiana, mas dá maior ênfase aos estudos da geometria descritiva (HARMAN, 1982).

Maxwell abre um frasco com amônia para exemplificar a diferença da velocidade das partículas individuais dos gases e a velocidade dos gases quando se difundem num meio preenchido por outro gás, no exemplo, a amônia difundindo-se na sala de palestra cheia de ar. Se a amônia se deslocasse na velocidade de suas moléculas, mal se abrisse o frasco já se sentiria o cheiro ‘na galeria’. Aos poucos, o cheiro de amônia será sentido pela audiência (MAXWELL, 1874). Esse elemento de experimentação trazido para a palestra é crucial para a compreensão do momento histórico representado pelo texto de Maxwell. Trata-se do último quarto do século XIX, os laboratórios de física com instrumentos cada vez mais capazes difundiram-se pela Grã-Bretanha e pelo continente europeu, a demonstração empírica é soberana e necessária, formando uma ilustração de força para a defesa teórica do autor (THEERMAN, 1986; MORUS, 1993; LAMBERT, 2011).

Apesar disso, nos laboratórios, os experimentos eram para poucos olhos. Em geral, poucos eram aceitos em seu interior. Por outro lado, surge, no século XIX, um forte movimento de “eletricistas”, pessoas de classes menos abastadas, que se dedicavam a realizar palestras para o público em que o experimento era elemento central de ilustração dos avanços científicos (MORUS, 1993). O fato de Maxwell inserir no interior de sua preleção esses elementos experimentais e em caráter demonstrativo mostra sua predileção pela divulgação científica e pela democratização do conhecimento. Essa preferência, como mostram Theerman (1986), Lambert (2011) e Cat (2012) e provém de uma interpretação teológica à qual subscreve moderadamente, em que a elevação do espírito está relacionada ao conhecimento do mundo, através do estudo da matemática e das ciências.

Mais adiante no texto, Maxwell alude a outros exemplos concretos experimentais dentro da sala de palestras, como veremos, mas, em seguida, descreve um experimento feito por Loschmidt em Viena, para mostrar a difusão dos gases usando dois gases diferentes que formam uma nuvem ao encontrarem-se, de modo a possibilitar sua visualização. Completa essa descrição com a metáfora de um enxame de abelhas, cujas abelhas voam em velocidades altas, mas o enxame em si move-se vagarosamente em determinada direção. A metáfora vai além, pois há locais em que os fazendeiros jogam farinha no enxame de abelhas para poder visualizá-las e, quando as abelhas de uma parte do enxame ficam brancas, gradualmente elas

misturam-se ao restante do enxame tornando-o homogeneamente intermeado por abelhas marcadas com a farinha, numa metáfora para explicar a difusão homogênea dos gases (MAXWELL, 1874).

Maxwell faz questão de afirmar a concordância do resultado de experimentos recentes com as previsões teóricas. Os modelos matemáticos usados para a física teórica são tomados de modo instrumental, são construções que permitem a obtenção de resultados sem importar a natureza ontológica dos objetos em estudo, pois, para Maxwell e muitos de seus contemporâneos, o conhecimento da essência das coisas da natureza, o conhecimento intrínseco da realidade do mundo, não está ao alcance humano, mas o acesso a esse mundo é dado através da teoria matemática, modo de aproximar-se do divino, e da experimentação prática, elemento novo introduzido pelas discussões teológicas de sua época e das quais participa (THEERMAN, 1986; LAMBERT, 2011). Embora não se possa descrever o mundo tal como ele é, nos é dada a possibilidade de compreendê-lo, descrevendo-o de modo que nos seja cognoscível. Há uma unidade na realidade do mundo e a compreensão dessa unidade está ao alcance humano.

Ao continuar a explicar a difusão dos gases, as velocidades incríveis das moléculas e o número altíssimo de suas colisões por segundo, prossegue mostrando um experimento com líquidos: “Tenho aqui uma jarra”<sup>63</sup>, mostra um líquido azul difundindo-se na água – aparentemente, o experimento havia sido preparado dias antes, para mostrar algum progresso no lento processo de difusão, cuja velocidade havia sido calculada por Voit. Novamente, experimento e cálculo matemático preciso são os elementos de demonstração. Quanto aos sólidos, seu movimento é muito restrito e não ocorre a difusão (MAXWELL, 1874).

Maxwell passa, então, a falar “brevemente” sobre o “mais maravilhoso movimento molecular chamado eletrólise”, outro experimento ilustrativo da palestra: “aqui está uma corrente elétrica passando através de água acidulada”<sup>64</sup>. A explicação dada ainda não incorporava o elétron, mas é feita em termos da suposição de que “correntes” de hidrogênio e de oxigênio estão passando pela água todo o tempo e que são “direcionadas” pela corrente elétrica (MAXWELL, 1874). Parece interessante o fato de que o termo “corrente” foi mantido até nossos dias para designar o fluxo de eletricidade num condutor, sendo o termo empregado por Maxwell como analogia às correntes nos fluidos.

---

<sup>63</sup> “I have here a jar” (MAXWELL, 1874).

<sup>64</sup> “We have no time to do more than mention that most wonderful molecular motion which is called electrolysis. Here is an electric current passing through acidulated water, and causing oxygen to appear at one electrode, and hydrogen at the other” (MAXWELL, 1874).

Maxwell chama atenção sempre para a aparente “calma” do líquido ou do gás que está sendo observado. Há algo de mágico nos segredos da natureza. Nem todos os fenômenos nos são dados a observar diretamente, mas o método científico proporciona, através do uso da matemática e dos experimentos, a sua compreensão e “visualização” (MAXWELL, 1874).

Segue resumindo o estado do conhecimento sobre a matéria das moléculas naquele momento. Velocidades, diâmetros, números de moléculas por centímetro cúbico, massas relativas, densidades relativas deduzíveis, aspectos sobre os quais “até aqui estamos em terreno firme” e relaciona diversos pontos sobre os quais os estudos avançam. Todos estes, aspectos ilustrados na tabela que apresenta com os valores calculados ou medidos em experimentos (MAXWELL, 1874). Diz,

De acordo com a tabela, que calculei a partir dos dados de Loschmidt, o tamanho das moléculas de hidrogênio é tal que cerca de dois milhões deles enfileirados ocupariam um milímetro e um milhão de milhões de milhões de milhões deles pesariam entre quatro e cinco gramas!<sup>65</sup> (MAXWELL, 1874)

num modo peculiar de expressar as grandezas.

Maxwell passa, então, a fazer a apologia do valor moral do trabalho científico,

Até aqui, temos considerado a ciência molecular como a investigação de fenômenos naturais. Entretanto, embora seja o objetivo expresso de todo trabalho científico desvendar os segredos da natureza, ele tem outro efeito, não menos valioso, sobre a mente do trabalhador. Deixa-o de posse de métodos que nada além do trabalho científico poderia tê-lo levado a inventar e coloca-o numa posição na qual muitas regiões da natureza, além daquela que ele tem estudado, aparecem sob novo aspecto. O estudo das moléculas desenvolveu um método próprio e que também está aberto para novas visões da natureza<sup>66</sup> (MAXWELL, 1874).

Em outras palavras, Maxwell diz que o objeto de estudo do cientista o faz desenvolver um método que serve para lançar um novo olhar sobre a natureza como um todo, fazendo uma relação entre o raciocínio e a natureza. Essa relação é direta, ou seja, existe, para Maxwell, uma analogia direta entre o raciocínio humano e a natureza do mundo que é observado (CAT,

---

<sup>65</sup> “According to the table, which I have calculated from Loschmidt's data, the size of the molecules of hydrogen is such that about two million of them in a row would occupy a millimetre, and a million million million million of them would weigh between four and five grammes!” (MAXWELL, 1874).

<sup>66</sup> “Thus far, we have been considering molecular science as an inquiry into natural phenomena. But, though the professed aim of all scientific work, is to unravel the secrets of Nature, it has another effect, not less valuable, on the mind of the worker. It leaves him in possession of methods which nothing but scientific work could have led him to invent, and it places him in a position from which many regions of Nature, besides that which he has been studying, appear under a new aspect. The study of molecules has developed a method of its own, and it has also opened up new views of Nature” (MAXWELL, 1874).

2012). Essa relação analógica entre pensamento e mundo é, para Maxwell, necessária e garantida por sua visão teológica (LAMBERT, 2012).

Volta a mencionar Lucrecio, aludindo às partículas de poeira que se pode observar movendo-se através de um raio de luz que entra num quarto escuro, em que o movimento de ciscos visíveis é justamente o resultado de um movimento muito mais complicado dos átomos invisíveis que chocam os ciscos de um lado para outro”<sup>67</sup>. O movimento dos átomos invisíveis é algo que nos é dado perceber pelos movimentos da poeira – um mundo invisível está acessível àqueles que se dispuserem a observar e estudar a natureza. Segue com a afirmação de que não se deve admirar o fato de que Lucrecio teria tentado “arrebentar os grilhões do Destino”, pois os átomos teriam cursos erráticos, incertos. Lucrecio atribuiria aos átomos um “tipo de vontade livre irracional que, em sua teoria materialista, é a única explicação para esse poder de ação voluntária da qual somos conscientes”<sup>68</sup> (MAXWELL, 1874). Observe-se que, aqui, Maxwell claramente faz alusão a uma visão de mundo sua, visão de mundo que explora em seus artigos mais filosóficos, inclusive sobre o livre-arbítrio, e que, não obstante, é claramente tributária de uma discussão e uma postura teológica.

O caráter determinante dos fenômenos naturais, ou da natureza, e a necessidade que encontramos nas relações matemáticas e causais que Maxwell chama de leis têm maior e mais profundo fundamento metafísico, tanto para a forma, quanto para a formação. São reunidas por uma unidade e um fundamento teológicos. Eles são parte e consequência de uma ordem divina<sup>69</sup> (CAT, 2012).

#### Era comum, em Cambridge, versões populares de uma teologia ecumênica

que informava e dava sentido ao seu compromisso pessoal para a investigação científica, explicando igualmente seus sucessos e limitações, fundamentos e limites (...) A introdução à filosofia natural requeria expor o lugar da filosofia natural, sua metafísica e metodologia, dentro da estrutura teológica<sup>70</sup> (CAT, 2012).

<sup>67</sup> “is but a result of the far more complicated motion of the invisible atoms which knock the motes about” (MAXWELL, 1874).

<sup>68</sup> “And it is no wonder that he should have attempted to burst the bonds of Fate by making his atoms deviate from their courses at quite uncertain times and places, thus attributing to them a kind of irrational free-will, which on his materialistic theory is the only explanation of that power of voluntary action of which we ourselves are conscious” (MAXWELL, 1874).

<sup>69</sup> “The determinate character of natural phenomena, or nature, and the necessity we find in the mathematical and causal relations Maxwell calls laws have a larger and deeper metaphysical foundation, regarding both form and formation. They are brought together by a theological unity and foundation. They are part and consequence of divine order” (CAT, 2012).

<sup>70</sup> “which informed and gave meaning to his personal commitment to scientific inquiry, explaining equally its successes and limitations, its grounds and bounds (...) The introduction to natural philosophy required

Seguindo com o texto da palestra, o autor passa a apresentar o problema dos três corpos, a saber, o problema de que se pode calcular as trajetórias do encontro de dois corpos, a partir de dados fornecidos, mas ao “lidar com milhões de moléculas”, não parece haver “solução legítima”. Diz que “os atomistas modernos adotaram, portanto, um método que é, acredito, novo no desenvolvimento da física matemática, embora já seja de longo uso na seção da estatística” e descreve como o uso da estatística nos departamentos de economia e “ciência social” para o estudo de populações humanas permite a determinação de quantidades, distinguindo o que seria o “método histórico”, em que se observa a conduta das pessoas em face às circunstâncias, do “método estatístico”, que pode ser aplicado tanto pelo educador ou político, quanto pelo astrônomo<sup>71</sup> (MAXWELL, 1874).

O determinismo da história humana é estabelecido por leis expressas em equações da dinâmica, “tais como aplicadas à matéria”, mas somente quando se possui “conhecimento perfeito de todos os dados”. Maxwell sustenta o determinismo nos assuntos humanos, talvez por não encontrar razão suficiente para sustentar o contrário, mas no que tange à matéria, “a menor porção de matéria que podemos sujeitar a experimentação consiste de milhões de moléculas, nenhuma das quais se torna sensível para nós”, o que impede a determinação do movimento de qualquer dessas partículas. Sendo assim, o “método histórico” é abandonado e adota-se o “método estatístico” para o estudo das moléculas em movimento, que é isento de

---

expounding on the place of natural philosophy, its metaphysics and methodology, within the theological framework” (CAT, 2012).

<sup>71</sup> O trecho todo é: “The modern atomists have therefore adopted a method which is, I believe, new in the department of mathematical physics, though it has long been in use in the section of statistics. When the working members of Section F get hold of a report of the census, or any other document containing the numerical data of Economic and Social Science, they begin by distributing the whole population into groups, according to age, income-tax, education, religious belief, or criminal convictions. The number of individuals is far too great to allow of their tracing the history of each separately, so that, in order to reduce their labor within human limits, they concentrate their attention on a small number of artificial groups. The varying number of individuals in each group, and not the varying state of each individual, is the primary datum from which they work. This, of course, is not the only method of studying human nature. We may observe the conduct of individual men and compare it with that conduct which their previous character, and their present circumstances, according to the best existing theory, would lead us to expect. Those who practise this method endeavor to improve their knowledge of the elements of human nature in much the same way as an astronomer corrects the elements of a planet by comparing its actual position with that deduced from the received elements. The study of human nature by parents and school-masters, by historians and statesmen, is therefore to be distinguished from that carried on by registrars and tabulators, and by those statesmen who put their faith in figures. The one may be called the historical, and the other the statistical method” (MAXWELL, 1874).



qualquer característica de precisão absoluta, ao contrário das leis da dinâmica<sup>72</sup> (MAXWELL, 1874). Para Brush,

Seu trabalho sobre [a teoria estatístico-molecular dos gases e do calor] levou-o não só à estimativa aceita de modo geral mais antiga do tamanho de um átomo (por Josef Loschmidt), mas forneceu parte do fundamento para a chamada “revolução probabilística” que afetou todas as áreas da ciência entre 1840 e 1940<sup>73</sup> (BRUSH, 2001).

Entretanto, ao deixar os experimentos de lado e passar para “as moléculas em si, deixamos o mundo do acaso e da mudança e entramos numa região onde tudo é certo e imutável”. Para Maxwell, com base no estado da arte da ciência empírica da época, em suas mais novas descobertas, “moléculas do mesmo tipo são absolutamente idênticas”<sup>74</sup> seja onde estiverem. Dá o exemplo das moléculas de oxigênio e hidrogênio, que terão as mesmas propriedades seja tendo sido extraídas “do ar, da água, de rochas de todas as épocas geológicas”, aludindo às medições feitas recentemente para as moléculas em cada uma dessas situações<sup>75</sup> (MAXWELL, 1874). Essa constância que as moléculas apresentam fortalece o argumento de Maxwell de que existe uma unidade no cosmo.

Ele utiliza o ensejo para introduzir o método de comparar propriedades de moléculas que consiste em medir através de um instrumento os comprimentos de ondas emitidos pelas moléculas em seus “movimentos internos”. Trata-se do espectroscópio, elemento técnico que permite o experimento que quantifica as ondas – e os períodos de vibração são os mesmos também no caso da luz, seja ela emitida pelo sol, seja emitida pelas estrelas fixas

---

<sup>72</sup> O trecho todo é: “The equations of dynamics completely express the laws of the historical method as applied to matter, but the application of these equations implies a perfect knowledge of all the data. But the smallest portion of matter which we can subject to experiment consists of millions of molecules, not one of which ever becomes individually sensible to us. We cannot, therefore, ascertain the actual motion of any one of these molecules, so that we are obliged to abandon the strict historical method, and to adopt the statistical method of dealing with large groups of molecules.

The data of the statistical method as applied to molecular science are the sums of large numbers of molecular quantities. In studying the relations between quantities of this kind, we meet with a new kind of regularity, the regularity of averages, which we can depend upon quite sufficiently for all practical purposes, but which can make no claim to that character of absolute precision which belongs to the laws of abstract dynamics” (MAXWELL, 1874).

<sup>73</sup> “His work in the first led not only to the earliest generally-accepted estimate of the size of an atom (by Josef Loschmidt) but provided part of the foundation for the so-called “Probabilistic Revolution” that affected all areas of science between 1840 and 1940” (BRUSH, 2001).

<sup>74</sup> “the properties of all molecules of the same kind are absolutely identical” (MAXWELL, 1874).

<sup>75</sup> O trecho todo é: “We can procure specimens of oxygen from very different sources—from the air, from water, from rocks of every geological epoch. The history of these specimens has been very different, and, if, during thousands of years, difference of circumstances could produce difference of properties, these specimens of oxygen would show it” (MAXWELL, 1874).

(MAXWELL, 1874, conforme trecho já citado acima). Isso garante que o hidrogênio que temos aqui será o mesmo hidrogênio existente em regiões distantes do universo e, para dar fundamento a essa ideia, Maxwell utiliza uma analogia que, curiosamente, é uma analogia com o uso de uma analogia geométrica: ao se comparar as construções egípcias e gregas antigas, parece que esses dois povos possuíam o mesmo sistema métrico; ainda que não houvesse registro dos sistemas métricos utilizados pelos dois povos, se poderia inferir, pelas dimensões de suas construções, que era esse o caso. Devido à analogia geométrica entre as construções e as unidades de medida, pode-se, por analogia, também inferir que resultados quantificados de natureza igual devem provir de causas iguais, como no caso do comprimento de ondas. O uso de uma analogia com a analogia geométrica parece proposital por parte de Maxwell, aproximando a analogia “poética” daquela matemática, precisa por natureza, mas este é só mais um exemplo do uso de analogias por parte do autor e que aparece numa passagem crucial para a compreensão de sua visão de mundo, de sua ontologia, de sua forte concepção de um mundo unitário e unificado por intenção divina.

A natureza consiste de mudança, de crescimento e decaimento, de evolução e degeneração, entretanto:

Nenhuma teoria de evolução pode ser formada para dar conta da similaridade das moléculas, pois a evolução necessariamente implica em mudança contínua e as moléculas são incapazes de crescimento ou decaimento, de geração ou destruição.

Nenhum dos processos da Natureza, desde o tempo em que a Natureza iniciou, produziu a menor diferença nas propriedades de qualquer molécula. Somos, assim, incapazes de atribuir seja a existência das moléculas, ou a identidade de suas propriedades, à operação de qualquer causa a que chamemos de natural<sup>76</sup> (MAXWELL, 1874).

A ideia de que existe uma clara interconexão entre os fenômenos do universo e constância e unidade com relação às leis que regem o universo é ilustrada por seu empreendimento, enquanto escrevia sobre eletromagnetismo, de trabalhar sobre o problema da estabilidade dos anéis de Saturno (GARBER, 2008). Maxwell utiliza o trabalho que fazia sobre a teoria dos gases ao mesmo tempo em que estudava o magnetismo e vence o concurso. Este parece ser um exemplo claro da visão de unidade da natureza. A unidade do universo aponta para que o comportamento dos satélites que formam os anéis de Saturno seja

---

<sup>76</sup> “No theory of evolution can be formed to account for the similarity of molecules, for evolution necessarily implies continuous change, and the molecule is incapable of growth or decay, of generation or destruction. None of the processes of Nature, since the time when Nature began, have produced the slightest difference in the properties of any molecule. We are therefore unable to ascribe either the existence of the molecules, or the identity of their properties, to the operation of any of the causes which we call natural” (MAXWELL, 1874).

previsível de acordo com os mesmos princípios que as partículas que formam os gases. Suas previsões, em pura elaboração teórica matemática, são confirmadas por observações posteriores (GARBER, 2008).

Peter Harman afirma que

Em 1850, os limites e a coesão interna da ciência da física estavam claramente articulados e havia alcançado novos conteúdos conceituais bem definidos e nova unidade. Próximo a 1850, alguns dos principais temas da física do século dezanove haviam sido formulados: a unificação dos fenômenos físicos dentro de uma única estrutura explanatória, a primazia da explicação física como programa explicativo, a matematização dos fenômenos físicos e o papel da analogia matemática como guia para a formulação das teorias físicas, além do enunciado do princípio da conservação da energia como lei universal, unificadora<sup>77</sup> (HARMAN, 1982, p. 12).

Ou seja, todo o contexto em que está inserido propicia uma abordagem tal como ele a faz: ideias de unificação, uso de analogias (ainda que iniciadas com a analogia matemática), uso de abordagens novas trazendo sucesso teórico.

O texto segue com uma das poucas afirmações de Maxwell sobre ciência em que o elemento teológico é inserido explicitamente (THEERMAN, 1986): a ciência deve parar, há um limite para o conhecimento humano. Não é possível “estudar o mecanismo interno de uma molécula que não pode ser desmontada” do mesmo modo que não é possível “investigar um organismo que não foi montado por ela” (a ciência) (MAXWELL, 1874, cf. trecho citado acima).

Essa visão de ciência e de natureza é algo que acompanhou o filósofo natural durante toda sua vida. Já no início de sua carreira, quando se aventurava a expressar-se filosoficamente, demonstra uma visão unificada do mundo e compreende a ciência de modo relacional e analógico. Isso fica claro no texto que será analisado a seguir.

### 3.4 Analogias reais

No texto *Are there real analogies in nature?* (MAXWELL, 1856a), defende que sim, as analogias são reais na natureza. Essa concepção reflete as discussões que ocorriam em seu

---

<sup>77</sup> “By 1850 some of the main themes of nineteenth-century physics had been formulated: the unification of physical phenomena within a single explanatory framework, the primacy of mechanical explanation as an explanatory programme, the mathematization of physical phenomena and the role of mathematical analogy as a guide to the formulation of physical theories, and the enunciation of the principle of energy conservation as a universal, unifying law” (HARMAN, 1982, p. 12).

tempo. Passava-se de uma visão em que haveria uma fronteira entre o “material” e o “ideal”, em que o corpo era inerentemente mal e a mente espiritualmente elevada para outra em que a elevação espiritual dependia de uma ligação entre a mente e o mundo, pois haveria uma analogia entre “a ordem do pensamento e a ordem do mundo”<sup>78</sup> (LAMBERT, 2011). A busca de elevação espiritual era uma preocupação central para Maxwell, que encontrava no estudo da ciência e da matemática o meio para essa elevação.

Entre 1855 e 1856, quando publicou *On Faraday's Lines of Force* (MAXWELL, 1855b), participava de uma sociedade chamada “os Apóstolos”, um “grupo de elite para discussões literárias e filosóficas”<sup>79</sup>, com “tons religiosos”<sup>80</sup> (THEERMAN, 1985). O objetivo do grupo era a elevação da alma através da instrução do espírito e tornou-se o “fórum através do qual Maxwell veio a desenvolver uma expressão intelectual para seu sentimento religioso e para considerar as implicações dessa compreensão para a sua ciência”<sup>81</sup> (THEERMAN, 1985). Esse tipo de expressão também se dava em sua participação em outra sociedade, de cultivo do estudo da matemática e que girava em torno do *Cambridge and Dublin Mathematical Journal*. O objetivo expresso dessa associação era o cultivo do estudo da matemática como meio de “elevação da alma” para longe da malignidade do corpo (LAMBERT, 2011).

É para a sociedade dos Apóstolos que lê o ensaio sobre as analogias (MAXWELL, 1856a). Em sua visão, a possibilidade de relacionamento entre a teoria abstrata e a configuração do mundo é estabelecida devido à relação direta, analógica, entre o mundo e o pensamento humano. Para o autor, essa relação não pode ser estudada ou compreendida, é garantida por Deus e é uma relação cuja verdade se estabelece por não haver alternativa de concepção. Deus estabeleceria uma unidade ao mundo e isso permite a inferência de que as leis da física deverão ser unas, deverão ter características que as unifiquem. Essa inspiração o faz investigar as analogias entre ramos da física estabelecidos de modo distinto, unificando-os num corpo teórico consistente e produtivo. Essa unificação reflete as discussões e visões correntes em sua época (STANLEY, 2012) e Maxwell é influenciado por autores como

---

<sup>78</sup> “The result was a new emphasis, beginning around mid-century, on analogies made between the order of thought and the order of things.” (LAMBERT, 2011).

<sup>79</sup> “An elite literary and philosophical discussion group” (THEERMAN, 1985).

<sup>80</sup> “In the 1840’s and 1850’s, the tone was religious” (THEERMAN, 1985).

<sup>81</sup> “the forum whereby Maxwell came to work out an intellectual expression for his religious sentiment and to consider the implications of that understanding for his science” (THEERMAN, 1985).

Hamilton, Whewell, Boole e Thomson (LAMBERT, 2011) além de ter tido intensa troca intelectual com amigos como Tait, Stokes e Campbell (HARMAN, 1998).

Para Nersessian (2002) e Lambert (2011), o uso de analogias por Maxwell não seria somente legítimo, como constituiria de modo crucial o seu método. O uso da analogia seria um meio-termo entre as postulações hipotéticas dos modelos teóricos e as construções matemáticas quantificadoras desses modelos. O uso da analogia permitiria a criação de imagens de mundo que são apenas esquemas alegóricos, metáforas, não se pretendendo ontológicos. Embora essas imagens pudessem ter relação com a verdadeira ontologia do mundo, a posição de Maxwell é a de que não se daria ao ser humano conhecer a “verdadeira ontologia”, a “essência do mundo”. Postular uma ontologia somente teria o efeito de prender o físico a ela, impedindo o avanço das teorias. O exemplo dado pelos autores citados é o da física laplaciana, que parte de uma ontologia que forma um modelo rígido da realidade, impedindo qualquer avanço teórico que colocasse essa ontologia em jogo. Os físicos, por estarem “presos” a entidades ontológicas como o éter e a ação à distância, limitariam seu poder de avanço teórico científico (NERSESSIAN, 2002; LAMBERT, 2011).

Alan Chalmers, entretanto, dialoga com Nersessian e outros afirmando que a analogia não teria importância na construção das teorias e nem no contexto da descoberta científica. Para Chalmers, o uso da analogia por parte do autor seria somente propedêutico, ou seja, auxiliar na retórica de explicação, na didática da descrição das construções teóricas, sendo a descoberta e a construção teórica em si trabalhos que utilizam a inferência sobre experimentos e o método hipotético-dedutivo somente. Chalmers mantém que o uso da analogia por parte de Maxwell é de caráter secundário e não representa um fator crucial em sua construção teórica (CHALMERS, 2001).

Esses autores, entretanto, parecem não dar a atenção devida aos modelos de Maxwell para as teorias do calor e dos gases, em que embora não pretenda estabelecer uma ontologia realista, afirma haver uma relação de similitude entre seu modelo (o de partículas em movimento e em choque como constituintes dos gases) e o que de fato deve estar lá no mundo, embora evite “especulações hipotéticas”, buscando ater-se ao tratamento matemático dos fenômenos (HARMAN, 1998, p. 91). Peter Harman chama atenção para a necessidade de tomar a obra do autor como um todo para poder compreender como se dá, para Maxwell, essa relação entre os modelos criados e uma ontologia possível, ou plausível.

Busca construir suas teorias de modo a que não dependam dessas postulações ontológicas, por exemplo, sua análise das linhas de força de Faraday é feita de modo a não depender da existência ou não de um éter, embora seu modelo seja baseado na hipótese de um

meio no qual as linhas de força estão embebidas, tal hipótese não carrega o peso de uma postulação realista, funciona como modelo concebível, no sentido de mostrar que é possível construir um modelo mecânico para o magnetismo (MAXWELL, 1873). Entretanto, em seus trabalhos sobre termodinâmica, aborda a teoria de modo diferente, postulando, aqui sim, uma relação mais direta entre os termos da teoria e elementos ontológicos do mundo, no caso, as partículas atômicas ou moleculares que formariam os gases (HARMAN, 1998). Apesar dessa aparente discrepância, é bastante claro o fato de que Maxwell evitava colocar-se de modo definitivo, deixando sempre margem para futuras “descobertas” e aguardando a confirmação empírica de postulados teóricos antes de outorgar-se fundador de algum posicionamento teórico, ou autor de alguma descoberta. Em outras palavras, o autor tinha uma postura prudente ao afirmar “verdades”, como descreve Stephen Brush (2001), mantendo sempre a possibilidade de correção futura das teorias científicas, tendo como base sólida a experimentação, mantendo um espírito de humildade diante da natureza e com relação à possibilidade do conhecimento humano sobre ela.

Antes de 1850, em Cambridge, o uso de argumentos por analogia “eram usados para manter uma fronteira rígida entre o material e o ideal, entre o corpo inerentemente mau e a mente espiritualmente elevada, e entre a sociedade secular e a cultura intelectual moralmente superior”<sup>82</sup> (LAMBERT, 2011). Essa dicotomia mantinha uma distinção clara entre “observação e experimentos produtores de fatos e a teoria, especialmente a teoria matemática”, que trazia ordem aos fatos. Após 1850, entretanto, um interesse sobre analogias entre o pensamento e as coisas, “trazendo o material e o ideal para mais próximos um do outro”<sup>83</sup>. Essa “ferramenta cognitiva”, portanto, é novidade que Maxwell passa a utilizar e a defender, estimulado pelo debate que ocorria naquela universidade enquanto fazia sua graduação. Ao iniciar seu trabalho de matematização das linhas de força de Faraday, Maxwell está inspirado por essa discussão (LAMBERT, 2011).

---

<sup>82</sup>“At Cambridge University before 1850, analogical arguments were used in order to maintain a strict boundary between the material and the ideal, between the inherently evil body and the spiritually elevated mind, and between secular society and a morally superior intellectual culture” (LAMBERT, 2011).

<sup>83</sup> O trecho todo é: “At Cambridge University before 1850, analogical arguments were used in order to maintain a strict boundary between the material and the ideal, between the inherently evil body and the spiritually elevated mind, and between secular society and a morally superior intellectual culture. This in turn encouraged a strict distinction between factproducing observation and experiment, and theory, especially mathematical theory, which brought order to those facts. In contrast, after 1850, arguments depending on an analogy between thought and things that brought the material and ideal closer together began to attract increased attention. Embedding Maxwell’s use of analogy in the broad range of analogical arguments being made from the beginning of the 1830s into the 1850s provides a means of telling a sociocultural history of a new cognitive tool.” (LAMBERT, 2011).

Essa característica de mudança de percepção do uso das analogias reflete-se logo ao início do texto *Are there real analogies in nature?* (MAXWELL, 1856a):

Como ainda temos dúvidas sobre a legitimidade do raciocínio por analogia [...] Está claro em face às coisas que as analogias parecem existir, pois todas as parábolas, fábulas, símiles, metáforas, tropos e figuras de linguagem são analogias, naturais ou reveladas, artificiais ou ocultas. A questão é totalmente a respeito de sua realidade<sup>84</sup> (MAXWELL, 1856a).

Primeiro, portanto, estabelece que existem analogias, são utilizadas na linguagem sob diversas formas, e coloca a questão “de sua realidade”, ou seja, se são reais na natureza. A questão é, de fato, se as analogias podem ser tidas como existentes na unidade da natureza, entre as ‘coisas’ da natureza. Além disso, e em função disso, se existem *entre a natureza e a mente* ou o espírito humano, e segue argumentando não haver dúvida quanto a que as analogias existem na mente:

Agora, não há dúvida quanto à possibilidade de haver analogia sem que haja uma mente para reconhecê-la; não seria sensato afirmar isso. Do mesmo modo, não se pode falar de uma demonstração ou refutação que exista incondicionalmente. Também não há nenhuma dúvida quanto à ocorrência de analogias para nossas mentes. São tão abundantes quanto os raciocínios, para não dizer quanto amoras silvestres<sup>85</sup> (MAXWELL, 1856a).

Resta saber se, e em que medida, existe analogia entre o pensamento e a natureza, ou seja, entre a mente e o mundo. O argumento de é o de que sim, existem, uma vez que tanto a mente como a natureza participam do mundo enquanto criação divina. Seu argumento, então, segue nessa direção, colocando a questão de se as analogias que percebemos existir entre “departamentos” diferentes da natureza estão de fato no mundo, ou seja, são constituintes do mundo, ou se fazem parte das “condições necessárias” para que o pensamento humano se dê:

Pois, para não mencionar todas as coisas na natureza externa que os homens veem como projeções de coisas em suas próprias mentes, toda a estrutura da ciência, até o ápice da filosofia, parece, por vezes, um modelo dissecado da natureza e, outras, um crescimento natural da superfície interna da mente. Agora, se, ao examinar as verdades admitidas da ciência e da filosofia, encontramos certos

---

<sup>84</sup> “But since we are still in doubt as to the legitimacy of reasoning by analogy [...] That analogies appear to exist is plain in the face of things, for all parables, fables, símiles, metaphors, tropes, and figures of speech are analogies, natural or revealed, artificial or concealed. The question is entirely of their reality” (MAXWELL, 1856a).

<sup>85</sup> “Now, no question exists as to the possibility of an analogy without a mind to recognize it—that is rank nonsense. You might as well talk of a demonstration or refutation existing unconditionally. Neither is there any question as to the occurrence of analogies to our minds. They are as plenty as reasons, not to say blackberries” (MAXWELL, 1856a).

princípios gerais que aparecem por toda a vasta gama de assuntos e, por vezes, reaparecem em alguma parte bastante distinta do conhecimento humano; e se, ao voltarmos-nos à constituição do intelecto em si, pensamos poder discernir aí a razão para essa uniformidade na forma de lei fundamental da ação correta do intelecto, concluiremos que esses vários departamentos da natureza em que existem leis análogas possuem interdependência real; ou que sua relação é só aparente e deve-se às condições necessárias do pensamento humano?<sup>86</sup> (MAXWELL, 1856a).

Nota-se, no texto que se segue, a clara influência do recente treinamento filosófico que teve em sua graduação, tendo sido aluno de Thomson e Whewell, com os quais estudou, certamente, Kant e Berkeley (LAMBERT, 2010). Faz, então, uma rápida retomada do argumento para a necessidade de certos conceitos, como o de número e, em seguida, o de espaço.

Quanto ao tempo e ao espaço, qualquer um dirá que “é conhecido e afirmado que são meras modificações de nossas próprias mentes”. [...] estamos convencidos da coexistência de diferentes objetos ao mesmo tempo e da identidade do mesmo objeto em momentos diferentes. Se admitirmos que podemos pensar em diferenças independentes de sua sequência, e em sequência sem diferenças, admitimos o suficiente para dar fundamento à possibilidade de ideias de espaço e tempo.

Mas se olharmos para essas ideias mais de perto, como seres humanos desenvolvidos, descobrimos que *seu* espaço tem tripla extensão e, ainda assim, é o mesmo em todas as direções, sem atrás ou antes, enquanto que o tempo se estende somente para trás e para frente, indo sempre para frente<sup>87</sup> (MAXWELL, 1856a).

Segue com a argumentação cujo objetivo é mostrar a necessidade de certos conceitos ou estruturas do pensamento. Não entra em questão se são *a priori*, como em Kant, mas repete o argumento de Whewell (STANLEY, 2012) para a necessidade do espaço de três dimensões: não o podemos conceber de outra maneira. Isso, para o autor, é um exemplo de analogia entre o intelecto e o mundo, uma analogia *real*.

---

<sup>86</sup> “For, not to mention all the things in external nature which men have seen as the projections of things in their own minds, the whole framework of science, up to the very pinnacle of philosophy, seems sometimes a dissected model of nature, and sometimes a natural growth of the inner surface of the mind. Now, if in examining the admitted truths in science and philosophy, we find certain general principles appearing throughout a vast range of subjects, and sometimes reappearing in some quite distinct part of human knowledge; and if, on turning to the constitution of the intellect itself, we think we can discern there the reason for this uniformity in the form of a fundamental law of the right action of the intellect, are we to conclude that these various departments of nature in which analogous laws exist have a real interdependence; or that their relation is only apparent and owing to the necessary conditions of human thought?” (MAXWELL, 1856a).

<sup>87</sup> “As for space and time, any man will tell you that “it is now known and ascertained that they are merely modifications of our own minds.” [...] we are convinced of the coexistence of different objects at the same time, and of the identity of the same object at different times. Now if we admit that we can think of difference independent of sequence, and of sequence without difference, we have admitted enough on which to found the possibility of the ideas of space and time.

But if we come to look more closely into these ideas, as developed in human beings, we find that *their* space has triple extension but is the same in all directions, without behind or before, whereas time extends only back and forward and always goes forward” (MAXWELL, 1856a, grifo no original).



Para investigar por que estas peculiaridades dessas ideias fundamentais são do modo que são requereria um ato de autoevisceração dos mais dolorosos, se não impossível; mas determinar se existe algo na natureza que corresponda a elas, ou se são meras projeções de nosso maquinário mental sobre a superfície das coisas externas, é algo absolutamente necessário para apaziguar as exigências da inteligência. Parece-me que, quando dizemos que o espaço tem três dimensões, não expressamos somente a impossibilidade de conceber uma quarta dimensão, coordenada com as três dimensões conhecidas, mas afirmamos uma verdade objetiva de que os pontos podem diferir em posição pela variação independente das três variáveis. Aqui, portanto, temos uma analogia *real* entre a constituição do intelecto e a do mundo exterior<sup>88</sup> (MAXWELL, 1856a).

Segue com um argumento semelhante com relação ao tempo e à noção de causa e efeito, concluindo pela inevitabilidade de seu argumento, de que as analogias são reais: “muito bem, a analogia entre razões, causas, forças, princípios e regras morais é evidente, mas é ofuscante”<sup>89</sup> (MAXWELL, 1856a). Em seguida, faz considerações sobre o conceito de “força” que, tomados no contexto do debate sobre a mecânica mencionado anteriormente, bem como o contexto dos desenvolvimentos científicos contemporâneos, mostram, não só como o autor busca inserir seus argumentos na atualidade das questões da época, como sua crença sólida no progresso do empreendimento científico.

O uso da palavra *força* aplicada à causa agrada aqueles de nós que se contentam com a pluralidade. *Causa* é uma palavra metafísica que implica em algo imutável e sempre produzindo seu efeito. *Força*, por outro lado, é uma palavra científica, que significa algo que sempre encontra oposição e, frequentemente, com oposição bem sucedida, mas nunca falha em fazer o que pode a seu próprio favor. Essas são as forças físicas com as quais a ciência lida e a sua máxima é que potência é direito e chamam-se a si mesmas de leis da natureza. Entretanto, há outras leis da natureza que determinam a forma e a ação da estrutura orgânica. São fundadas nas forças da natureza, mas o único trabalho que parecem exercer é aquele da direção. Deveriam ser chamadas forças? Uma força trabalha em proporção ao seu esforço (força). Essas forças *diretas* trabalham sob um modelo. São *moldes*, não são forças. Bem, como o que temos aqui é um padrão que em que podem ocorrer desvios, temos ao lado da noção de *esforço*, que pertence à força, a noção de *saúde*, que pertence à lei orgânica. Seres orgânicos não são seres conscientes das leis orgânicas, e não é o ser consciente que participa delas, mas outro conjunto de leis aparece agora e que está

---

<sup>88</sup> “To inquire why these peculiarities of these fundamental ideas are so would require a most painful if not impossible act of self-exentation; but to determine whether there is anything in nature corresponding to them, or whether they are mere projections of our own mental machinery on the surface of external things, is absolutely necessary to appease the cravings of intelligence. Now it appears to me that when we say that space has three dimensions, we not only express the impossibility of conceiving a fourth dimension, coordinate with the three known ones, but assert the objective truth that points may differ in position by the independent variation of three variable. Here, therefore, we have a *real* analogy between the constitution of the intellect and that of the external world” (MAXWELL, 1856a, grifo no original).

<sup>89</sup> “Now the analogy between reasons, causes, forces, principles, and moral rules is glaring, but dazzling” (MAXWELL, 1856a).

em conexão muito próxima ao ser consciente. O que quero dizer é que são as leis do pensamento<sup>90</sup> (MAXWELL, 1856a).

Nota-se como vai tecendo seu argumento em favor de uma analogia forte entre o pensamento e o mundo, calcada na relação que há entre o fato de que o intelecto é produzido por algo orgânico, corporal.

As leis orgânicas, ou distúrbios físicos, podem interferir nelas, e não há dúvida de que cada uma dessas interferências é regulada por leis do cérebro e da conexão entre a medula e o processo de pensamento. Entretanto, o que se deve notar é que as leis que regulam o processo *certo* do intelecto são idênticas às leis mais abstratas de todas, encontradas entre as relações das verdades necessárias e que, embora estejam misturadas com os sistemas mais complexos de fenômenos na fisiologia e na física, e sejam modificadas por eles, elas precisam ser reconhecidas como supremas com relação às outras leis do pensamento. Essa supremacia não consiste em ter capacidades (forças) superiores, como no caso das leis físicas, como também penso que não reproduzem um tipo como as leis orgânicas o fazem, mas consiste em serem certas e verdadeiras; mesmo quando outras causas tenham sido, por um tempo, mestras do cérebro<sup>91</sup> (MAXWELL, 1856a).

Percebe-se a preocupação do autor com a preservação do livre arbítrio e com a garantia de haver ‘causas físicas’ para o intelecto:

Quando consideramos ações voluntárias em geral, pensamos ver causas agindo como forças sobre o ser que tem vontades. Alguns de nossos movimentos surgem da necessidade física, outros da irritabilidade ou excitação orgânica, ainda outros são realizados por nossa maquinária sem nosso conhecimento, e outros evidentemente devem-se a nós mesmos e a nossas volições. Destas, ainda, algumas são meramente a repetição de um ato costumeiro, outras devido a atrações de prazer ou da pressão de atividade constrangida e umas poucas mostram algumas indicações de serem resultado de atos distintos da vontade. Aqui, novamente, temos uma continuação da

---

<sup>90</sup> “Those who are thus content with plurality delight in the use of the word *force* as applied to cause. *Cause* is a metaphysical word implying something unchangeable and always producing its effect. *Force*, on the other hand, is scientific word, signifying something which always meets with opposition, and often with successful opposition, but yet never fails to do what it can in its own favour. Such are the physical forces with which science deals, and their maxim is that might is right, and they call themselves laws of nature. But there are other laws of nature which determine the form and action of organic structure. These are founded on the forces of nature, but they seem to do no work except that of direction. Ought they to be called forces? A force does work in proportion to its strength. These *direct* forces to work after a model. They are *molds*, not forces. Now since we have here a standard from which deviation may take place, we have besides the notion of *strength*, which belongs to force, that of *health*, which belongs to organic law. Organic beings are not conscious of organic laws, and it is not the conscious being that takes part in them, but another set of laws now appear in very close connection with the conscious being. I mean the laws of thought” (MAXWELL, 1856a).

<sup>91</sup> “These may be interfered with by organic laws, or by physical disturbances, and no doubt every such interference is regulated by the laws of the brain and of the connection between the medulla and the process of thought. But the thing to be observed is, that the laws which regulate the *right* process of the intellect are identical with the most abstract of all laws, those which are found among the relations of necessary truths, and that though these are mixed up with, and modified by, the most complex systems of phenomena in physiology and physics, they must be recognized as supreme among the other laws of thought. And this supremacy does not consist in superior strength, as in physical laws, nor yet, I think, in reproducing a type as in organic laws, but in being right and true; even when other causes have been for a season masters of the brain” (MAXWELL, 1856a).

analogia da causa. Alguns supõem que, no caso da vontade, haviam encontrado a única causa verdadeira e que todas as causas físicas eram apenas aparentes. Não preciso dizer que essa doutrina foi explodida.

O que precisamos notar é que elementos novos entram na natureza dessas causas elevadas, pois razões meramente abstratas são simplesmente absolutas; forças relacionam-se por seu esforço (força); leis orgânicas agem em direção a semelhanças a tipos; emoções animais tendem àquilo que promove a alegria de viver; e a vontade está, em grande medida, de fato sujeita a todos esses elementos, embora outras leis de *correção*, que são abstratas e demonstráveis como aquelas da razão, são *supremas* entre as leis da vontade<sup>92</sup> (MAXWELL, 1856a).

Retomando a questão da realidade das analogias, considera o argumento de que todos os fenômenos deveriam ser explicados a partir de um “movimento primeiro”. Se esse tipo de explicação puder ser encontrado, ou seja, uma fundamentação de todo conhecimento a partir de “leis fundamentais do movimento primeiro” que se relacionem não só ao “produto extraordinário da vida orgânica”, que é o pensamento, mas “a todo escopo da ciência”, então as “semelhanças entre leis de classes diferentes de fenômenos dificilmente se chamariam analogias, pois seriam somente identidades transformadas”.

Além disso, caso se tome as leis do pensamento abstrato, sem tomá-lo como produto ‘fisiológico’, “essas analogias aparentes se tornam meras repetições por reflexo de certos modos de ação necessários dos quais nossas mentes são sujeito”. Independente de qual dessas hipóteses for tomada em conta, para o autor, não há como “dar conta da existência de um conjunto de leis cuja supremacia seja necessária, mas cuja operação seja contingente”<sup>93</sup>

---

<sup>92</sup> “When we consider voluntary actions in general, we think we see causes acting like forces on the willing being. Some of our motions arise from physical necessity, some from irritability or organic excitement, some are performed by our machinery without our knowledge, and some evidently are due to us and our volitions. Of these, again, some are merely a repetition of a customary act, some are due to the attractions of pleasure or the pressure of constrained activity, and a few show some indications of being results of distinct acts of the will. Here again we have a continuation of the analogy of cause. Some had supposed that in will they had found the only true cause, and that all physical causes are only apparent. I need not say that this doctrine is exploded.

That we have to observe is that new elements enter into the nature of these higher causes, for mere abstract reasons are simply absolute; forces are related by their strength; organic laws act toward resemblances to types; animal emotions tend to that which promotes the enjoyment of life; and will is in great measure actually subject to all these, although certain other laws of *right*, which are abstract and demonstrable, like those of reason, are *supreme* among the laws of will” (MAXWELL, 1856a).

<sup>93</sup> O trecho todo é: “Now the question of the reality of analogies in nature derives most of its interest from its application to the opinion that the phenomena of nature, being varieties of motion, can only differ in complexity, and therefore the only way of studying nature is to master the fundamental laws of motion first and then examine what kinds of complication of these laws must be studied in order to obtain true views of the universe. If this theory be true, we must look for indications of these fundamental laws throughout the whole range of science, and not least among those remarkable products of organic life, the results of cerebration (commonly called “thinking”). In this case, of course, the resemblances between the laws of different classes of phenomena should hardly be called analogies, as they are only transformed identities.

If, on the other hand, we start from the study of the laws of thought (the abstract logical laws, not the *physiological*), then these apparent analogies become merely repetitions by reflection of certain necessary modes of action to which our minds are subject. I do not see how, upon either hypothesis, we can account for the existence of one set of laws of which the supremacy is necessary, but to the operation contingent.” (MAXWELL, 1856a).

(MAXWELL, 1856a). Com esse argumento, espera ter descartado as duas teorias em que as analogias não teriam “existência real”, o de que todos os fenômenos seriam explicados em termos das leis do movimento, a partir do movimento primeiro, e o de que tudo se poderia explicar levando-se em conta somente as leis do pensamento abstrato.

A principal hipótese sobre a qual funda sua argumentação é a de que existe um ‘substrato orgânico’, por assim dizer, para o pensamento, ou seja, há uma relação forte entre a materialidade do cérebro e a mente. Além disso, toma a garantia do livre arbítrio, algo aparente ao senso comum, e a complexidade dos fenômenos como indicadores de que as duas hipóteses rejeitadas não procedem. Seu argumento em favor da realidade das analogias começa a se delinear:

Mas encontramos outro conjunto de leis, cuja operação é inflexível quando está em ação, mas que depende de ser iniciado por algum ato de volição. A teoria da consequência das ações é grandemente confundida pelo fato de que cada ato coloca em movimento muitas cadeias de maquinário, que reagem sobre outros agentes e adentram regiões de caos físico e metafísico das quais é difícil desemaranhá-lo<sup>94</sup> (MAXWELL, 1856a).

Seu argumento seguinte é o da moralidade dos eventos. Utilizando uma metáfora que lhe é cara, a do “telescópio da teoria”, afirma que, caso seja

ajustado adequadamente, para ver não os eventos físicos que formam os focos subordinados do distúrbio propagado através do universo, mas o foco moral onde a verdadeira imagem do ato original é reproduzido então poderemos reconhecer o fato de que quando vemos claramente qualquer ato moral, uma necessidade moral aparece para as cadeias de consequências daquele ato, que se espalham pelo mundo a partir da concentração em um foco, de modo a dar uma imagem verdadeira e completa do ato do ponto de vista moral<sup>95</sup> (MAXWELL, 1856a).

Ao vermos um ato moral, do mesmo modo que ao iluminar objetos não vemos somente a luz que os ilumina, mas o objeto iluminado, vemos não somente os acontecimentos físicos daquele evento moral, mas o vemos *como* um ato moral. Cada ato moral tem consequências cuja regularidade inferimos a partir da observação repetida. Essa inferência

---

<sup>94</sup> “But we find another set of laws, the operation of which is inflexible when once in action but depends in its beginning on some act of volition. The theory of the consequence of actions is greatly perplexed by the fact that each act sets in motion many trains of machinery, which react on other agents and come into regions of physical and metaphysical chaos from which it is difficult to disentangle them” (MAXWELL, 1856a).

<sup>95</sup> “But if we could place the telescope of theory in proper adjustment, to see not the physical events which form the subordinate foci of the disturbance propagated through the universe but the moral foci where the true image of the original act is reproduced, then we shall recognize the fact that when we clearly see any moral act, then there appears a moral necessity for the trains of consequences of that act, which are spreading through the world to be concentrated on some focus, so as to give a true and complete image of the act in its moral point of view” (MAXWELL, 1856a).

permite estabelecer leis regulares necessárias para a justiça, fundadas na relação de causa e efeito. A “ordem de coisas” morais interfere “com a ordem mecânica das coisas” e, suspeita, “as duas ordens de coisas se dissolverão em uma só eventualmente”<sup>96</sup> (MAXWELL, 1856a).

Assumindo ter sido confuso com relação ao tema da lei moral, sua introdução teve o objetivo de mostrar como se pode relacionar coisas similares, das quais uma não se conhece bem. Essa é uma operação realizada “sempre”. Embora os “pares de coisas” relacionados “possam diferir grandemente umas das outras, a *relação* de um dos pares pode ser a mesma que no outro”. Fica claro o tema que, como apontamos, estava em voga e o autor toma como base para sua argumentação: embora não possamos conhecer as “coisas em si”, podemos conhecer as relações entre elas. Em ciência, “a *relação* é a coisa mais importante a ser conhecida, um conhecimento de uma coisa nos leva em grande medida em direção ao conhecimento de outra”. Sendo assim, é necessário distinguir as relações entre si, por alguma diferença entre elas, para Maxwell, esse é o trabalho da ciência, a descrição das relações existentes entre as coisas. Em seguida, toma a metáfora do “livro da natureza”, que necessariamente tem suas partes relacionadas entre si, cada “capítulo” explicando e indicando outros capítulos, numa ordem significativa. A natureza não poderia ser como uma “revista”, cujas partes não são relacionadas entre si, mas são somente um agregado de assuntos. Para o autor, seria “tolo” achar isso, uma vez que o conhecimento de uma parte do mundo “joga luz” sobre outras partes não conhecidas<sup>97</sup>.

---

<sup>96</sup> O trecho todo é “If we think we see in the diverging trains of physical consequences not only a capability of forming a true image of the act but also of reacting upon the agent, either directly or after a long circuit, then perhaps we have caught the idea of *necessary* retribution as the legitimate consequence of all moral action. But as this idea of *necessary* reaction of the consequence of action is derived only from a few instances, in which we have guessed at such a law among the necessary laws of the universe, and we have a much more distinct idea of *justice*, derived from those laws which we necessarily recognize as supreme, we connect the idea of retribution much more with that of *justice* than with that of *cause and effect*. We therefore regard retribution as the result of *interference* with the mechanical order of things, and intended to vindicate the supremacy of the right order of things, but still we suspect that the two orders of things will eventually dissolve into one” (MAXWELL, 1856a).

<sup>97</sup> O trecho todo é “I have been somewhat diffuse and confused on the subject of moral law, in order to show to what length analogy will carry the speculations of men. Whenever they see a relation between two things they know well, and think they see there must be a similar relation between things less known, they reason from the one to the other. This supposes that although pairs of things may differ widely from each other, the *relation* in the one pair may be the same as in the other. Now, as in a scientific point of view the *relation* is the most important thing to know, a knowledge of the one thing leads us a long way toward a knowledge of the other. If all that we know is relation, and if all the relations of one pair of things correspond to those of another pair, it will be difficult to distinguish the one pair from the other, although not presenting a single point of resemblance, unless we have some difference of relation to something else whereby to distinguish them. Such mistakes can hardly occur except in mathematical and physical analogies, but if we are going to study the constitution of the individual mental man, and draw all our arguments from the laws of society on the one hand, or those of the nervous tissue on the other, we may chance to convert useful helps into wills-of-the-wisp. Perhaps the “book,” as it has been called, of nature is regularly paged; if so, no doubt the introductory parts will explain those that follow, and the methods taught in the first chapters will be taken for granted and used as illustrations in the more

Os últimos três parágrafos de seu texto são significativos; tomando como provado que as analogias são reais, fica claro para o autor que:

Talvez a analogia mais extraordinária seja aquela entre o princípio, lei ou plano de acordo com o qual todas as coisas são feitas conforme aquilo que devem fazer e a intenção que o homem tem em fazer coisas que funcionarão. A doutrina das causas finais, embora seja produtiva de esterilidade em sua forma exclusiva, certamente foi de grande ajuda aos inquisidores da natureza; e se mantivermos somente a existência da analogia e permitirmos a observação para determinar sua forma, não poderemos ser levados muito distantes da verdade.

Existe outra analogia que parece superar a primeira em seu próprio terreno, que se baseia no princípio, lei ou plano de acordo com o qual as formas das coisas foram feitas para ter certa comunidade de tipo e que induz os artistas humanos a fazerem um conjunto de coisas diferentes de acordo com variedades do mesmo modelo. Aqui, aparentemente, a causa final é a analogia ou homogeneidade, excluindo a utilidade.

Por fim, temos formas secundárias de cristais desabrochando sobre nós e brilhando na rigidez da necessidade matemática, não nos dizendo nada sobre a harmonia, o projeto, utilidade ou significância moral; nada além da trigonometria esférica e as analogias de Napier. É porque excluimos cegamente a lição desses corpos angulares do domínio do conhecimento humano que ainda temos dúvidas sobre a grande doutrina de que as únicas leis da matéria são aquelas que nossas mentes podem fabricar e as únicas leis da mente são aquelas que a matéria fabricou para ela<sup>98</sup>.

A análise desse texto deixa claro que seu uso de analogias não tinha somente valor propedêutico, sem um compromisso ontológico, como afirmaram alguns autores, como, por exemplo, Pierre Duhem (ABRANTES, 1998), enquanto outros defendiam seu uso legítimo, embora por razões diferentes, como seria o caso de Poincaré (ABRANTES, 1998). Em texto que apresenta as teorias de Maxwell, Poincaré (2008) afirma que “duas teorias contraditórias, desde que não as misturemos e não busquemos nelas os fundamentos das coisas, podem ambas ser instrumentos úteis de pesquisas” (POINCARÉ, 2008). Poincaré fala num momento

---

advanced parts of the course; but if it is not a “book” at all, but a *magazine*, nothing is more foolish to suppose that one part can throw light on another” (MAXWELL, 1856a).

<sup>98</sup> “Perhaps the next most remarkable analogy is between the principle, law, or plan according to which all things are made suitably to what they have to do, and the intention which a man has of making things which will work. The doctrine of final causes, although productive of barrenness in its exclusive form, has certainly been a great help to inquirers into nature; and if we only maintain the existence of the analogy, and allow observation to determine its form, we cannot be led far from the truth.

There is another analogy which seems to be supplanting the other on its own ground, which lies between the principle, law, or plan, according to which the forms of things are made to have a certain community of type, and that which induces human artists to make a set of different things according to varieties of the same model. Here apparently the final cause is analogy or homogeneity, to the exclusion of usefulness.

And last of all we have the secondary forms of crystals bursting in upon us, and sparkling in the rigidity of mathematical necessity, and telling us neither of harmony of design, usefulness, or moral significance—nothing but spherical trigonometry and Napier’s analogies. It is because we have blindly excluded the lesson of these angular bodies from the domain of human knowledge that we are still in doubt about the great doctrine that the only laws of matter are those which our minds must fabricate, and the only laws of mind are fabricated for it by matter” (MAXWELL, 1856a).

em que as teorias de Maxwell estão sendo “comprovadas” por experimentos científicos, mas parece defender que o uso das analogias, embora não possa ser tomado como fundamento ontológico, serve como instrumento heurístico no caso de Maxwell. Talvez a insistência desses autores, Duhem e Poincaré, em afirmar que o uso de metáforas e modelos seria de ordem heurística e propedêutica reflitam a crença na necessidade de manter as teorias científicas isentas de elementos dependentes da imaginação e da metáfora, crença de que a ciência pode ser construída de modo isento, neutro e objetivo.

De modo similar, João Paulo Príncipe (2010) afirma que o método da “analogia física” de Maxwell seria um intermediário entre as equações complicadas da física teórica puramente matemática e as “teorias que partem de hipóteses físicas”, pois essas hipóteses teriam força de manterem-se soberanas, ainda que equivocadas, como no caso da “ação à distância”. “O progresso da pesquisa física demanda um processo de simplificação e de redução dos resultados (...) o método das analogias físicas permite não sermos levados para longe da verdade por uma hipótese favorita” (PRÍNCIPE, 2010). O uso da matemática “permite avaliar a correção de uma ilustração” (PRÍNCIPE, 2010).

Norton Wise (1979), num artigo sobre a imagem do “abraço mútuo entre eletricidade e magnetismo”, faz uma descrição pormenorizada do desenvolvimento das teorias físicas da eletricidade, do magnetismo, da luz e do calor em Maxwell, e afirma não distinguir entre “analogias”, “modelos físicos” e “imagens visuais”, tratando-os todos como “imagens”, que são “representações de fenômenos naturais que funcionam primariamente como símbolos e possuem, frequentemente, conotações metafóricas”. Segundo ele, a defesa do uso da mecânica clássica pelos físicos da época não passava por vê-la como “mero instrumento heurístico que guiava a pesquisa”, mas insistiam não haver outro modo possível de explicação (WISE, 1979). O uso de analogias por parte dos britânicos na física, iniciado por Thomson e desenvolvido por Maxwell, tem sua origem no uso das analogias em geometria. Maxwell parte das concepções de “linhas de força” descritas por Faraday, de modo proeminente ilustrativo, ou seja, utilizando-se de gráficos e esboços, literalmente imagens, para desenvolver uma teoria do eletromagnetismo que dispensava a noção de ação à distância, propondo uma ação que “percorria” campos do espaço. Essa imagem de forças atuando sobre campos possibilitava um tratamento geométrico e aritmético, que foi explorado por Maxwell no desenvolvimento de suas famosas equações. Wise (1979) mostra que o desenvolvimento das equações de Maxwell, embora aparentemente tenha sido através da “simples” adição de alguns termos a equações já apresentadas por outros antes dele e de sua reunião num conjunto

coeso, foi guiado e inspirado pelas imagens de Faraday a partir das quais o físico desenvolve seu trabalho teórico.

Para Harman (1998), o uso das analogias por Maxwell é feito de modo a tomá-las enquanto analogias geométricas, ou seja, não seriam as analogias triviais da linguagem coloquial, ou da literatura, mas as analogias da geometria. Sendo a geometria produtora de conhecimento verdadeiramente necessário e tendo o mundo características espaciais passíveis de descrição e compreensão através da geometria, a relação entre o raciocínio matemático geométrico das teorias e a natureza se dá na ordem direta do conhecimento seguro, tendo-se sempre em conta a possibilidade do erro humano na construção das teorias. Aborda as “linhas de força” como um trabalho em que Faraday não desenvolve sua teoria de modo aritmético, mas como sendo o trabalho de “um matemático da mais alta ordem”, num exemplo de como Maxwell tinha as imagens de Faraday como passíveis de matematização através da geometria, o que permitiria o uso da analogia com segurança (HARMAN, 1998, pp. 74ss). Além disso, as analogias são “físicas”, pois dizem respeito a relações entre fenômenos que não são descritos conforme a geometria, como no caso da teoria dos gases (HARMAN, 1998, p. 177).

Nancy Nersessian (2002) advoga não só o uso da analogia como legítimo no exercício do método científico, como reclama haverem retirado sua importância histórica no pensamento de Maxwell, já que, segundo afirma, diversos historiadores e filósofos da ciência simplesmente teriam deixado de lado esse uso, relegando-o a um papel secundário, de função apenas heurística. Para Nersessian, o uso da analogia é central para a compreensão das teorias maxwellianas e seu desenvolvimento, enquanto autores como Chalmers e Duhem, entre outros, não teriam dado a importância devida ao papel crucial da analogia na descoberta científica de Maxwell. Chalmers defende-se, afirmando

Sugiro que essa posição de Maxwell seja melhor compreendida, não como metodologia geral da ciência, mas como reação estratégica específica à situação que confronta no eletromagnetismo. (...) Maxwell deixa claro que seu modelo em ‘Physical Lines’ [On Physical Lines of Force, 1861] tinha a intenção de ser um guia heurístico para aqueles que, como ele, estavam ‘insatisfeitos com a explicação [dos fenômenos eletromagnéticos] baseados na hipótese de forças atrativas e repelentes’ e esperavam que fosse ‘de alguma utilidade para aqueles que consideram o fenômeno como devido à ação em um meio’ (CHALMERS, 1986).

Entretanto, o cuidado com que apresenta a analogia como ferramenta heurística não invalida a possibilidade de que o autor teria uma visão de mundo em que os fenômenos da natureza, embora não pudessem ser conhecidos plenamente por nós humanos, foram criados por Deus de um modo a apresentarem essa unidade (CAT, 2012). Isso parece ser corroborado



por textos como *Are there real analogies in nature?* (MAXWELL, 1856a) em que afirma exatamente isso, que as analogias são características da natureza, ou seja, que na natureza existem analogias reais.

João Paulo Príncipe (2010) afirma que o método da “analogia física” de Maxwell seria um intermediário entre as equações complicadas da física teórica puramente matemática e as “teorias que partem de hipóteses físicas”, pois essas hipóteses teriam força de manter-se soberanas, ainda que equivocadas, como no caso da “ação à distância”. “O progresso da pesquisa física demanda um processo de simplificação e de redução dos resultados (...) o método das analogias físicas permitem não sermos levados para longe da verdade por uma hipótese favorita”. Mais adiante em seu texto, Príncipe mostra como, para Maxwell, o uso da matemática “permite avaliar a correção de uma ilustração”.

De fato, como aponta Kargon (1969), ao longo da obra de Maxwell, até o final de sua vida, o autor sustenta o método analógico como modo autêntico de produção de conhecimento, embora, segundo Kargon, em seus últimos textos, ele tenha buscado uma forma de manter “a paz” nas controvérsias em torno da legitimidade do uso da analogia. Para Kargon,

Em razão das diferenças de orientação entre os cientistas, a verdade científica, nas palavras de Maxwell, deveriam ser apresentadas de formas diferentes, todas igualmente tomadas como científicas, seja na forma vívida da ilustração física, seja na pálida expressão de quantidades matemáticas. Além disso, variedades de analogia ou metáfora são úteis aos homens de ciência. (...) A natureza dessa ilustração ou “metáfora científica” depende, de acordo com Maxwell, totalmente do temperamento da mente do praticante científico. Vê-se que as duas teorias explicam, não só os fenômenos com o auxílio dos quais elas foram originalmente construídas, mas outros fenômenos, que não se pensou ou não se conhecia na época; e ambas chegaram, independentemente, ao mesmo resultado numérico, que dá a velocidade absoluta da luz em termos de quantidades elétricas (KARGON, 1969).

Como vimos, para o físico, existe uma relação entre o pensamento (o raciocínio abstrato da matemática) e o mundo. As analogias de Maxwell são também “físicas”, ou seja, muito embora as hipóteses utilizadas nas teorias fossem mais ou menos distanciadas daquilo que se espera ser a realidade, o que garante seu sucesso em explicar o mundo é sua conexão real. A mesma relação que permite o conhecimento sobre o mundo, a analogia entre as leis do pensamento e as leis do mundo, é a relação que encontra no mundo para explicá-lo. Não conhecemos as coisas em si, mas podemos conhecer e explorar as relações entre as coisas, e as analogias permitem esse desenvolvimento.

Maxwell utiliza a analogia para desenvolver modelos de um modo novo: inaugura uma nova metodologia científica, que foi usada a partir de então na Física e nas ciências

naturais a partir de seu trabalho (HON; GOLDSTEIN, 2012). Sua grande percepção foi a possibilidade que a matematização traz para o trabalho com modelos: as analogias são feitas em uma só via, não são bidirecionais, mas unidirecionais. O artifício imaginário é utilizado para poder dar forma à matematização. Uma vez utilizado, pode até ser descartado, pois essa matematização, então, aplicada aos experimentos em cheque com a natureza (ou o laboratório) permitem novas modelagens. Os modelos são “fôrmas” nas quais a massa teórica cresce, mas não “fôrmas” descartáveis, não se confundem com uma ontologia. O crucial, para Maxwell, é a matemática bem aplicada e a conferência empírica, ou seja, tomar a prova da experiência, do experimento, para ajustar a aplicação matemática da teoria. Modelos são hipóteses a serem testadas, mas não no sentido de hipóteses reais, ou seja, não se pretende experimentar, nem quantificar, em vista a encontrar corroboração ontológica para essas hipóteses. São hipóteses plausíveis, possíveis, tornando pertinente o tratamento matemático e as propostas de experimentação. Permitem o avanço da ciência sem o compromisso metafísico e ontológico, apesar de estar sempre consciente e preocupado com as discussões metafísicas (HON; GOLDSTEIN, 2012). A imaginação, aspecto natural da mente humana, entra em jogo como pivô central, como possibilitadora de produção de conhecimento novo.

## CONCLUSÃO

Inaugurando uma nova maneira de utilizar modelos em ciência, em que o uso da analogia permite a ligação entre as postulações hipotéticas dos modelos teóricos e as construções matemáticas quantificadoras desses modelos, crendo num mundo unificado e buscando, através da teoria científica, as ligações que permitem perceber essa unificação. Ao não se prender a nenhuma ontologia específica, estava livre para relacionar fenômenos entre si, bem como cálculos e metáforas também entre si e com os fenômenos.

Essa flexibilidade em operar com metáforas e utilizar a matemática adequada a cada situação, partindo do pressuposto de unidade do mundo, parece ser a resposta à questão colocada no início. O sucesso do empreendimento científico de Maxwell se dá ao vincular o mundo de modo bastante geral a essa unidade – pressuposto intuitivo e teológico, vinculando-se moderadamente à mecânica clássica, dentro do espírito de sua época, e vinculando-se aos resultados de experimentos. O componente que foi crucial para seu bem-sucedido modo de fazer ciência é justamente a maleabilidade com que apresenta seus modelos para explicar os fenômenos. A rigor, seus parâmetros rígidos seriam somente a lógica e a matemática e a unidade do mundo. Como foi mostrado, tanto o mecanicismo, quanto a observação de fenômenos, na natureza ou através de experimentos, não podiam ser vínculos tão fortes, afinal, muitos eram os fenômenos que não podiam ser observados, como os anéis de Saturno, e os resultados de experimentos tinham sua quantificação muitas vezes duvidosa, principalmente por ser uma época em que ainda se definiam unidades de medição.

O grande sucesso da física de Maxwell se deve ao fato de que considerou o mundo em toda sua gama de fenômenos, incluindo a experiência humana, como entidade única e unificada e, partindo disso, deixando maleáveis todos os outros parâmetros. Essa liberdade, que parte de base sólida, teve resultados que foram além daquilo que o autor esperava, além daquilo que seus contemporâneos poderiam conceber. Por ter seu vínculo na analogia e unidade do mundo, em vez de em alguma ontologia específica, suas equações permanecem válidas e produtivas, ainda que o éter e os vórtices tenham sido abandonados como modelo.

Em sua visão de que Deus criou a natureza unificada e, por isso, pode-se partir do princípio de que há relação analógica entre campos aparentemente díspares do estudo da física, a própria agência divina é elemento supérfluo. Evidentemente, dada sua religiosidade, Maxwell tomava a criação divina como garantia para sua postulação – e talvez isso tenha dado força a esse vínculo em especial. Independente disso, podemos, sim, acatar facilmente a

ideia de que existe uma unidade no mundo, quer seja garantida por divindades, ou por qualquer outro princípio metafísico. Embora seja um princípio que se pode adotar de modo axiomático e intuitivo, não parece haver razões para não tomá-lo como base para compreensão do mundo, tendo em vista os benefícios que aparentemente sua assunção traz. A aposta de Maxwell, baseada na crença de que seria vontade divina que exploremos a natureza através do saber científico, é, do mesmo modo, facilmente acatada. Sua religiosidade fervorosa é motivação e justificativa para fazer ciência. Independente de nossos próprios sentimentos com relação à religião, uma proposta conciliadora entre as crenças religiosas, ou sua ausência, e o empreendimento científico sempre é bem-vinda. Do mesmo modo intuitivo, somos simpáticos à ideia de que o uso de metáforas em ciência seja algo não só legítimo, como necessário para a criação de teorias científicas.

Assim, como suspeitávamos, existe uma dimensão que vai além da esfera das considerações metodológicas de uma análise interna das teorias científicas a ser explorada pelo historiador e filósofo da ciência. Essa esfera, que abrange o campo da estética, no sentido de que abarca temas como a metáfora e a beleza, e que abrange o campo das relações humanas, configuradas em suas instituições e contextos sociohistóricos, aumenta incomensuravelmente o âmbito de pesquisa e desenvolvimento. Entretanto, não seja por essa razão que devemos nos limitar em seu estudo. Não mais buscando verdades universais e absolutas, simplesmente assumindo o ponto de vista humano, essa atividade seria válida ainda que fosse somente pelo simples fato de que é fascinante e bela. Do mesmo modo que o mundo pode ser estudado como algo unificado, cujas partes interrelacionam-se de modo crucial, também o empreendimento científico não poderá ser compreendido sem suas dimensões externas, à custa de sérios prejuízos à ciência e à humanidade.

## REFERÊNCIAS

ABRANTES, P. **Imagens de natureza, imagens de ciência**. Campinas: Papyrus, 1998.

BLACK, N. H., **Practical Physics**. Toronto: The Macmillan Co., 1913.

BEZERRA, V. A. Maxwell, a teoria do campo e a desmecanização da física. **Scientiae Studia**, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 177-220, 2006.

\_\_\_\_\_. Estruturas conceituais e estratégias de investigação: modelos representacionais e instanciais, analogias e correspondência. **Scientiae Studia**. São Paulo, vol.9, n.3, pp. 585-609, 2011.

BRUSH, STEPHEN G. The Development of the Kinetic Theory of Gases. VIII. Randomness and Irreversibility. **Archive for History of Exact Sciences**, 1974, Vol 12, Num 1, Pages 1-88.

\_\_\_\_\_. **Cautious Revolutionaries**: Maxwell, Planck, Hubble. University of Maryland, 2001.

CAMPBELL, L; GARNETT, W. **The Life of James Clerk Maxwell**; With a Selection from his Correspondence and Occasional Writings and a Sketch of his Contributions to Science; Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

CAT, J. Into the ‘regions of physical and metaphysical chaos’: Maxwell’s scientific metaphysics and natural philosophy of action. **Stud Hist Phil Sci**, 43: 91-104, 2012.

CHALMERS, A. F. The heuristic role of Maxwell’s mechanical model of electromagnetic phenomena. **Stud Hist Phil Sci**, 1986, 17: 415-427.

\_\_\_\_\_. Maxwell, mechanism, and the nature of electricity. **Phys. Perspect.**, 2001, 3: 425-438.

D’AGOSTINO, S. **A history of the ideas of theoretical physics** – essays on the nineteenth and twentieth century physics. Bordrecht/Boston/London: Kluwer Academica Publishers, 2000.

DARRIGOL, O. The electrodynamics of moving bodies from Faraday to Hertz. **Centaurus**, 1993a, 36: 245-260.

DARRIGOL, O. The electrodynamic revolution in Germany as documented by early German expositions of "Maxwell's theory". **Arch. Hist. Exact. Sci.**, 1993b, 45: 189-280.

\_\_\_\_\_. **Electrodynamics from Ampère to Einstein**. Oxford: Oxford University Press. 2000.

DOUGAL, R. C.; GREATED, C. A.; MARSON, A. E. Then and now: James Clerk Maxwell and colour. **Optics & Laser Technology**, 38: 210-218, 2006.

EVERITT, C. W. F. James Clerk Maxwell. in GILLISPIE, Coulston Charles. **Dicionário de biografias científicas**. Vol. III. Rio de Janeiro: Contraponto, 2007.

GARBER, E. Subjects Great and Small: Maxwell on Saturn's Rings and Kinetic Theory. **Phil Trans: Math Phys Eng Sci**, vol. 366, No. 1871, pp. 1697-1705, 2008.

HESSE, M. **Models and Analogies in Science**, Notre Dame: University of Notre Dame Press, 1966.

\_\_\_\_\_. Logic of Discovery in Maxwell's Electromagnetic Theory, in: GIÈRE, R.; WESTFALL, R. (Ed.), **Foundations of Scientific Method: The Nineteenth Century** Notre Dame: Indiana University Press, 1973.

HARMAN, P. **Energy, Force, and Matter: The Conceptual Development of Nineteenth-Century Physics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.

\_\_\_\_\_. Newton to Maxwell: The 'Principia' and British Physics. **Notes and Records of the Royal Society of London**. Vol. 42, No. 1, Newton's 'Principia' and Its Legacy (Jan., 1988), pp. 75-96, 1988.

\_\_\_\_\_. Maxwell and Faraday. **Eur. J. Phys.** n. 14 (p. 148-154). 1993.

\_\_\_\_\_. **The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell**. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

HON, G.; GOLDSTEIN, B. Maxwell's contrived analogy: An early version of the methodology of modeling. **Studies in History and Philosophy of Modern Physics** 43: 236-257, 2012.

KARGON, R. Model and analogy in Victorian science: Maxwell's critique of the French physicists. **J. Hist. Ideas.**, 1969, 30; 423-436.

KRÜGER, L. The Slow Rise of Probabilism: Philosophical Arguments in the Nineteenth Century. in: **The Probabilistic Revolution**. Volume 1: Ideas in History. (KRÜGER, L.; DASTON, L.; e HEIDELBERGER, M., orgs). London: Bradford, 1988.

LAKOFF, G.; JOHNSON, M. **Metaphors We Live By**, Chicago: University of Chicago Press, 1980.

LAMBERT, K. The Uses of Analogy: James Clerk Maxwell's 'On Faraday's Lines of Force' and Early Victorian Analogical Argument. **Brit. J. Hist. Sci.** 44, 2011: 61-88.

LONGAIR, M. S. Maxwell and the Science of Colour. **Phil Trans R Soc A**, 366; 1685-1696, 2008.

MAXWELL, J. C. On the theory of rolling curves. 1849. in NIVEN, W D. (ed.) **The Scientific Papers of James Clerk Maxwell**. (Two volumes bound in one). New York: Dover. 1965.

\_\_\_\_\_. On the description of oval curves, and those having a plurality of foci. 1851. in NIVEN, W D. (ed.) **The Scientific Papers of James Clerk Maxwell**. (Two volumes bound in one). New York: Dover. 1965.

\_\_\_\_\_. Inaugural lecture at Aberdeen. 1855a. **The scientific letters and papers of James Clerk Maxwell**. Vol. 1., p. 419-431. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

\_\_\_\_\_. On Faraday's Lines of Force. 1855b, in: **The Scientific Papers of James Clerk Maxwell**, vol. 1, Cambridge: Cambridge University Press, 1890.

\_\_\_\_\_. Are there real analogies in nature. 1856a. Disponível em: <[http://www.ideayayinevi.com/metinler/real\\_analogies/are\\_there\\_real\\_analogies\\_in\\_nature.htm](http://www.ideayayinevi.com/metinler/real_analogies/are_there_real_analogies_in_nature.htm)> Acesso em: 22 abr. 2012.

\_\_\_\_\_. On the Theory of Compound Colours with reference to Mixtures of Blue and Yellow Light. 1856b. in NIVEN, W D. (ed.) **The Scientific Papers of James Clerk Maxwell**. (Two volumes bound in one). New York: Dover. 1965.

\_\_\_\_\_. Account of Experiments on the Perception of Colour. 1857. in NIVEN, W D. (ed.) **The Scientific Papers of James Clerk Maxwell**. (Two volumes bound in one). New York: Dover. 1965.

\_\_\_\_\_. Illustrations of the Dynamical Theory of Gases, Part I. 1860a. in NIVEN, W D. (ed.) **The Scientific Papers of James Clerk Maxwell**. (Two volumes bound in one). New York: Dover. 1965.

MAXWELL, J. C. Inaugural lecture at King's College, London. 1860b. **The scientific letters and papers of James Clerk Maxwell**. Vol. 1., p. 670. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

\_\_\_\_\_. On the theory of three primary colours. 1861a. in NIVEN, W D. (ed.) **The Scientific Papers of James Clerk Maxwell**. (Two volumes bound in one). New York: Dover. 1965.

\_\_\_\_\_. On Physical Lines of Force. 1861b. in NIVEN, W D. (ed.) **The Scientific Papers of James Clerk Maxwell**. (Two volumes bound in one). New York: Dover. 1965.

\_\_\_\_\_. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. 1865. in NIVEN, W D. (ed.) **The Scientific Papers of James Clerk Maxwell**. (Two volumes bound in one). New York: Dover. 1965.

\_\_\_\_\_. Michael Faraday. 1861. in: **Michael Faraday: A história química de uma vela; As forças da matéria**. Trad.: RIBEIRO, Vera. Rio de Janeiro: Contraponto, 2003.

\_\_\_\_\_. Colour Vision. 1871. in NIVEN, W D. (ed.) **The Scientific Papers of James Clerk Maxwell**. (Two volumes bound in one). New York: Dover. 1965.

\_\_\_\_\_. **A Treatise on Electricity and Magnetism**. Vol. 1 e vol. 2. Londres: Machmillan and Co. 1873.

\_\_\_\_\_. The Theory of Molecules. **Popular Science Monthly** Vol 4 Jan. 1874. Disponível em:  
<[http://en.wikisource.org/wiki/Popular\\_Science\\_Monthly/Volume\\_4/January\\_1874/The\\_Theory\\_of\\_Molecules](http://en.wikisource.org/wiki/Popular_Science_Monthly/Volume_4/January_1874/The_Theory_of_Molecules)> Acessado em maio de 2012.

\_\_\_\_\_. Atom. **Encyclopædia Britannica**, Ninth Edition 3 36-49. 1875. Disponível em:  
[http://en.wikisource.org/wiki/Encyclop%C3%A6dia\\_Britannica,\\_Ninth\\_Edition/Atom](http://en.wikisource.org/wiki/Encyclop%C3%A6dia_Britannica,_Ninth_Edition/Atom).  
Acessado em maio de 2012.

MORUS, I. Currents from the Underworld: Electricity and the Technology of Display in Early Victorian England. **Isis**, 1993, 84: 50-69.

NERSESSIAN, N. Maxwell and the method of physical analogy: model-based reasoning, generic abstraction, and conceptual change *in: Reading Natural Philosophy –* MALAMENT, David, pgs. 129-166, 2002.

OLGIVIE, G. I. James Clerk Maxwell and the Dynamycs of Asrtrophysical Discs **Phil. Trans. Math. Phys. Eng. Sci.** Vol 366, N. 1871, pp. 1701-1715. 2008.



POINCARÉ, H. Eletricidade e óptica: as teorias de Maxwell e a teoria eletromagnética da luz (aulas proferidas em 1888-1889) in: \_\_\_\_\_ **Ensaio Fundamentais**. VIDEIRA, ANTÔNIO; MOREIRA, ILDEU (orgs); RIBEIRO, VERA (trad.) Rio de Janeiro: Contraponto, 2008.

PRÍNCIPE, J. P. L'analogie et le pluralisme méthodologique chez James Clerk Maxwell. **Revista de Filosofia e Ciência**, 1; pp. 55-73. Universidade de Évora, 2010

REID, J. S. James Clerk Maxwell's Scottish Chair. **Phil Trans R Soc A**, 366; 1661-1684, 2008.

STANLEY, M. By design: James Clerk Maxwell and the evangelical unification of science. **Brit J Hist Sci**. Vol 45, issue 01, March: 57-73, 2012.

THEERMAN, P. James Clerk Maxwell and religion. **Amer. J. Phys.**, 1986, 34: 312-317.

VERSCHUUR, G. **Hidden Attraction: The History and Mystery of Magnetism**. Oxford: Oxford University Press, 2000.

VIDEIRA, A. A. P. Kirchoff e os fundamentos da mecânica. **Scientiae Studia**. 2011, vol.9, n.3, pp. 611-624.

WISE, M. N. The Mutual Embrace of Electricity and Magnetism. **Science**, Vol. 203, March 30, 1979: 1310-1318.