



Michael Faraday, James Maxwell, Heinrich Hertz e Albert Einstein são figuras incontornáveis no estabelecimento do eletromagnetismo, tal como o conhecemos em 2023.

### De Faraday a Einstein

Nas suas experiências da Lei da Indução eletromagnética, em 1830, [Michael Faraday](#) (1791-1867) mostrou que, para esta lei, só é importante o movimento relativo dentro do sistema e não é importante o movimento relativamente a um referencial externo.

Em setembro de 1845, Michael Faraday descobriu que um campo magnético interagia com a luz. Esta extraordinária descoberta foi fundamental para que se começasse a pôr a hipótese de que a luz seria também um campo eletromagnético. Esse efeito passou a chamar-se de "[Rotação de Faraday](#)", ouvir o [correspondente Podcast do IST](#). Vários cientistas tentaram reproduzir, sem sucesso, o efeito de Rotação de Faraday. Ainda hoje, esta experiência só é fácil de reproduzir com instrumentação muito sofisticada, coisa que Faraday não tinha. Mas tinha um talento nato para fazer experiências muito organizadas, precisas e meticolosas sem instrumentação sofisticada.

Alguns anos antes de sua morte, Faraday proferiu uma palestra na [Royal Society](#) sobre "[As Várias Forças da Matéria e Suas Relações entre Si](#)", que continha uma série de observações que sugeriam que Faraday pensava e acreditava na universalidade das leis físicas em qualquer referencial.

Em 1857, Faraday recebeu uma cópia de um artigo escrito por um jovem professor do [Marischal College](#), quando ainda era estudante em [Cambridge](#), com o título "*On Faraday's Lines of Forces*". O autor era [James Clarke Maxwell](#) (1831-1879), um físico e matemático extraordinário que procurava uma forma de exprimir fisicamente o termo filosófico *electro-tonic state* usado por Faraday.

Faraday agradeceu muito a Maxwell o interesse mostrado pelas suas teorias. Talvez entusiasmado por Maxwell ter dado atenção ao seu trabalho, Faraday publicou um artigo propondo a ideia das linhas de força gravitacionais, na sequência da sua palestra "[Ray-vibrations](#)" de 1846. Faraday estava receoso de que esta ideia não fosse bem aceite pela comunidade científica e pediu a opinião de

Maxwell que lhe respondeu que fazia todo o sentido: *the gravitational lines of force could “weave a web across the sky “and “guide the stars in their courses “.*

Faraday fez uma série de tentativas experimentais para demonstrar que a força da gravidade também estava relacionada com as outras forças da natureza, nomeadamente com o magnetismo e a eletricidade, mas não obteve qualquer resultado que lhe permitisse validar essa crença. Só mais tarde, com a Teoria da Relatividade Geral de [Albert Einstein](#) (1879-1955), se viria a prever alguma interação.

Aprofundando as ideias de Faraday e tendo por base as suas experiências, relatadas no *“Experimental Researches on Electricity”*, Maxwell, em 1864, criou a Teoria das Ondas Eletromagnéticas, segundo a qual os fenómenos eletromagnéticos se propagam nos diversos meios, como ondas, a uma velocidade que era próxima da já conhecida velocidade da luz. As 20 equações originais de Maxwell, publicadas três anos antes de Faraday falecer, ainda mereceram um comentário de Faraday: deve haver uma linguagem mais simples para explicar o eletromagnetismo às pessoas normais<sup>1</sup>.

No seu livro *“A Treatise on Electricity and Magnetism”*, vol I, publicado em 1873, Maxwell escreve: *se por qualquer coisa que escrevi aqui eu puder ajudar qualquer estudante a compreender os modos de pensamento e expressão de Faraday, considerarei isso como a realização de um dos meus principais objetivos, comunicar aos outros o mesmo prazer que encontrei ao ler as “Faraday Researches”.*

Alguns cientistas, hoje designados por Maxwellianos, aceitaram a teoria de Maxwell, um deles, [Hermann Helmholtz](#) (1821-1894), foi dos primeiros cientistas alemães a dar crédito aos trabalhos de Faraday e de Maxwell. Mas haveria de ser um seu ex-aluno de doutoramento, [Heinrich Hertz](#) (1857-1894), a comprovar experimentalmente esta teoria.

Hertz, entre 1883 e 1888, fez experiências para comprovar a teoria de Faraday-Maxwell<sup>2</sup>, 20 anos depois e, em 1888, publicou os resultados que comprovaram a existência de ondas eletromagnéticas, tendo concluído que estas se comportam como a luz em todos os dispositivos que construiu e ensaiou.

Mas Hertz, sobre as ondas eletromagnéticas, dizia aos seus alunos: são bonitas, mas não sei qual será a sua utilidade.

Hertz, em 1890, publicou um estudo teórico sobre as Equações Eletromagnéticas para Corpos em Movimento na *“Wiedemann’s Ann. 41, p. 369”*, e que depois, em 1893, reproduziu no seu livro *“Electric Waves”*, mas viria a ser Einstein, 15 anos mais tarde, a resolver de forma mais completa este assunto.

---

<sup>1</sup> - As quatro equações de Maxwell, que atualmente usamos, são devidas ao cientista e engenheiro [Oliver Heaviside](#) (1850-1925) e são baseadas em grandezas fisicamente mensuráveis, o que não acontecia com muitas das variáveis usadas por Maxwell.

<sup>2</sup> - Hertz, tal como Maxwell, consideravam que a teoria de Maxwell teve uma grande influência dos trabalhos de Michael Faraday. Por essa razão referia-se a esta teoria pela designação “Faraday-Maxwell Theory”.

Entretanto, em 1887, dois cientistas estadunidenses [Albert A. Michelson](#) (1852-1931) e [Edward W. Morley](#) (1838-1923), publicaram os resultados duma experiência que mostrou que a velocidade da luz é constante e é independente do caminho percorrido e da direção em que se observa.

Em 1905, Albert Einstein, no ano mais criativo da sua vida de cientista genial, demonstrou teoricamente que a velocidade da luz era constante para todos os observadores em todos os referenciais que fosse observada. Nesse ano, Einstein mostrou a equivalência entre massa e energia. A conclusão de Einstein é a de que o tempo é variável e não é constante para todos os pontos do universo como previa [Isaac Newton](#) (1643-1727). O tempo e o espaço teriam de acomodar o facto de a velocidade de propagação da luz e de outras perturbações eletromagnéticas ser constante.

Para Einstein cada acontecimento passa a ser descrito pelas coordenadas (x,y,z,t).

De acordo com a teoria da relatividade geral de Einstein, apresentada em 1915, as forças entre as massas, conhecida por gravidade, curvam o espaço. Se um feixe de luz, ou uma radiação eletromagnética, passar perto de um objeto massivo, uma estrela ou planeta, embora a luz siga pela geodésica desse espaço, seria desviada do seu curso.

A luz, campo eletromagnético, segue sempre a geodésica nesse espaço, com velocidade constante, mas como este se deformou o trajeto deixou de ser uma linha reta. Os fótons seguiram sempre no seu caminho, mas foi o caminho espaço-tempo que se alterou.

Einstein teria de esperar apenas quatro anos para ter a comprovação experimental desta teoria. Em 1919, a observação de uma estrela distante durante um eclipse do Sol pode confirmar que a estrela passou a estar visível apesar de estar em linha reta por traz do Sol, devido à deformação espaço tempo provocada pelo Sol.

Da teoria de Einstein da Relatividade Geral resultaria também a existência de ondas gravitacionais, mas a confirmação experimental só seria demonstrada em 2015 através da experiência [LIGO](#) e que valeu a atribuição do prémio [Nobel da Física em 2017](#). [Veja aqui a explicação do colega Prof José Sande Lemos sobre as ondas gravitacionais e sobre o LIGO.](#)

### **Einstein revoluciona a Física Moderna**

Como Einstein afirmou, 75 anos depois de Faraday ter formulado a lei de indução eletromagnética, foi fundamental a ideia comprovada experimentalmente por Michael Faraday das leis invariantes em relação a referenciais absolutos e em que só contam os movimentos relativos, que o inspirou na criação da Teoria da Relatividade.

Einstein acreditava no princípio da covariância geral, de que deveria ser possível escrever as leis da física da mesma forma em todos os sistemas de coordenadas, mesmo com as coordenadas a variarem no tempo.

Em 1931, comemorando o centenário do nascimento de Maxwell, Albert Einstein comentou o trabalho de Maxwell como sendo "o mais profundo e frutífero que a física descobriu desde Newton".

Sobre a experiência fundamental de Michelson-Morley, Albert Einstein escreveu: *"Se a experiência de Michelson-Morley não nos tivesse causado tanto constrangimento, ninguém teria considerado a teoria da relatividade como uma redenção"*.

Einstein também confirmou a convicção, revolucionária de Faraday, de que os campos tinham existência própria, não precisavam do famigerado éter para se propagarem e que podiam existir mesmo quando a fonte que os originou já não existisse.

Ainda hoje recebemos sinais eletromagnéticos de [pulsares de estrelas](#) de neutrões, que são autênticos faróis eletromagnéticos e que têm sido úteis no estudo do universo.

Algumas destas estrelas já não existem, mas continuamos a receber a informação que radiaram.

O famoso cientista estadunidense [John Wheeler](#) (1911-2008), depois de colaborar com Einstein, resumia o avanço conseguido pela teoria da relatividade geral da seguinte forma: a massa diz ao espaço como se curvar e o espaço-tempo diz à massa como se mover.



# Rotação de Faraday

## Uma luz nova sobre o

## Eletromagnetismo

