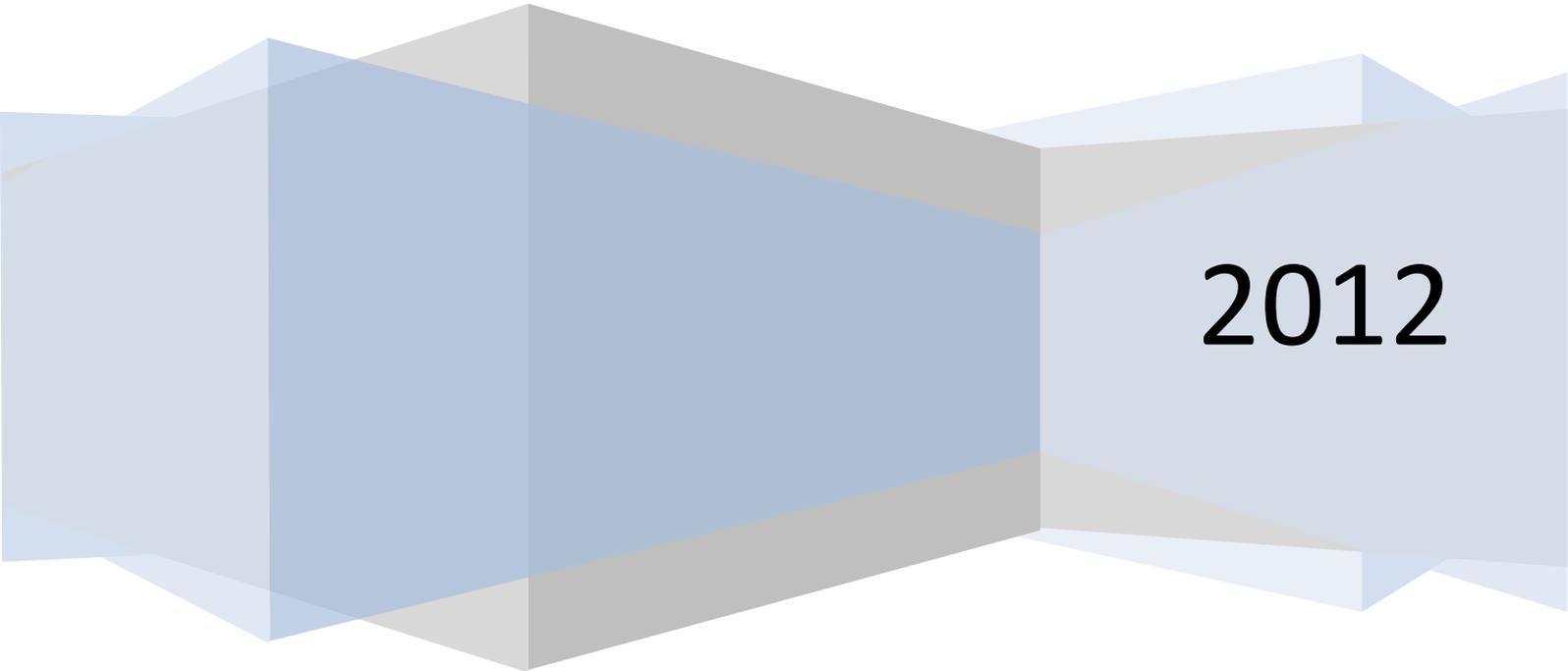


Instituto de Física de São Carlos – Universidade de São Paulo

O Dilema de Abraham-Minkowski

Hilde Harb Buzzá

Disciplina: Interação Luz Matéria – Philippe Courteille



2012

O Dilema da Abraham-Minkowski

1 INTRODUÇÃO

1.1 O Eletromagnetismo no vácuo

O eletromagnetismo clássico descreve as relações existentes entre eletricidade e magnetismo e a geração dos campos elétricos e magnéticos a partir de cargas e correntes. Durante o século XIX, vários físicos contribuíram com o desenvolvimento da teoria do eletromagnetismo que foi unificado por James Maxwell nas equações conhecidas como “Equações de Maxwell”. Essas quatro equações descrevem como campos elétricos e magnéticos são gerados por cargas e correntes elétricas e por variação temporal dos campos elétrico e magnético. Há ainda a “Equação de força de Lorentz”, que descreve como os campos, elétrico e magnético, realizam força sobre cargas e correntes elétricas.

Estas cinco equações estão descritas pelas equações abaixo.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{E}\rho + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

As equações de Maxwell prevêm a existência de ondas eletromagnéticas que se propagam no vácuo. Pode-se notar que a variação de um campo oscilante gera o outro e essa combinação faz com que o campo se propague.

A partir dessas equações, a densidade de energia eletromagnética foi definida como:

$$u_{e.m.} = \frac{\epsilon_0}{2} |\mathbf{E}|^2 + \frac{1}{2\mu_0} |\mathbf{B}|^2$$

E o fluxo de energia eletromagnética no vácuo, chamado de vetor de Poyting, é definido como:

$$\mathbf{S}_{e.m.} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B}$$

É importante notar que as definições utilizadas para a densidade e fluxo de energia não são as únicas possíveis, mas as mais utilizadas na literatura. Assume-se, então, que essa onda

tenha um momento \mathbf{P} . Sendo U a energia inicial da onda, temos que $P=U/c$. Assumindo a fórmula do fluxo de energia, chegamos que a densidade de momento eletromagnético no vácuo é:

$$\mathbf{p}_{e.m.} = \varepsilon_0 \mathbf{E} \times \mathbf{B}$$

1.2 Propagação no meio – O início da controvérsia

As expressões de densidade de energia e de momento para ondas se propagando no vácuo são amplamente aceitas pela comunidade científica, não havendo qualquer tipo de controvérsia.

Porém, quando inserimos um meio transparente, por exemplo, água ou vidro, há uma interação dos campos, elétrico e magnético, com as cargas do meio. Com isso, pode haver uma transferência de energia e momento para elas, ao mesmo tempo em que as cargas do meio em movimento podem alterar esses campos.

Portanto, é preciso considerar as respostas do meio aos campos e, numa visão macroscópica, o comportamento global dos campos e das cargas do meio. Para isso, são inseridas quatro grandezas: polarização (\mathbf{P}), magnetização (\mathbf{M}), o vetor deslocamento elétrico (\mathbf{D}) e o vetor do campo magnético (\mathbf{H}).

Há uma relação entre a densidade de momento de dipolo elétrico no meio e polarização, assim como entre densidade de momento de dipolo magnético e magnetização. As novas relações entre os termos ficam, então:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M}$$

É extremamente importante ressaltar que há diversas possibilidades de abordagem de momento e energia em ondas eletromagnéticas na matéria, mas as abordagens de Minkowski e Abraham datadas do início do século XX têm destaque na história da ciência.

1.3 Meios não dispersivos e a descrição do dilema

Meios não dispersivos são caracterizados pela não dependência da resposta do meio com a frequência do campo eletromagnético incidente. Neste caso, tanto Minkowski quanto Abraham prevêm a mesma densidade de energia, dado por

$$u_{e.m.} = \mathbf{E} \frac{\mathbf{D}}{2} + \mathbf{B} \frac{\mathbf{H}}{2}$$

E o mesmo vetor de Poyting, dado por:

$$S_{e.m.} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

Porém, o dilema começa com as previsões da densidade de momento, uma vez que Abraham prevê $p_{ab} = \mathbf{E} \times \frac{\mathbf{H}}{c^2}$ e Minkowski prevê $p_{Min} = \mathbf{D} \times \mathbf{B}$ mostrando não só uma diferença quantitativa como uma diferença qualitativa.

A polarização no meio dielétrico linear isotrópico não magnético é proporcional ao campo elétrico, a magnetização é nula e o campo magnético é dado por $|\mathbf{B}| = |\mathbf{E}| n/c$. A partir dessas formulações é feita a razão entre o módulo da densidade de momento e a densidade de energia, resultando em:

$$\text{Abraham: } \frac{1}{nc} \qquad \text{Minkowski: } \frac{n}{c}$$

Considerando um fóton no vácuo, o momento é dado por $h\omega/2\pi c$. Quando esse fóton entra no meio, Abraham prevê que uma **diminuição** do momento para $h\omega/2\pi nc$ enquanto Minkowski prevê, para a mesma situação, que ele **umenta** para $nh\omega/2\pi c$.

Essa diferença, então, gerou uma discussão que se estendeu por décadas, envolvendo diferentes tipos de experimentos que ora concordavam com os resultados de Abraham, ora com os de Minkowski.

2.0 – ALGUNS EXPERIMENTOS REALIZADOS AO LONGO DA HISTÓRIA – PERSISTINDO O DILEMA

Vários experimentos foram realizados ao longo dos anos, desde que foi estabelecido o dilema.

Em 1951, foi realizado um experimento por Jones e colaboradores e foi aperfeiçoado ao longo dos anos. Esse experimento visava medir a pressão de radiação de ondas eletromagnéticas em espelhos imersos em líquidos dielétricos. Para isso, um tubo é parcialmente preenchido enquanto uma fibra de torção sustenta um espelho fora do líquido e um dentro, iluminado de forma assimétrica. A fibra de torção é girada até que esse torque cancele o gerado pela pressão de radiação da luz. A leitura da posição angular da fibra é feita utilizando-se o espelho fora do líquido. Esses experimentos mostraram que a pressão de radiação é proporcional ao índice de refração do líquido o que é condizente com a demonstração de Minkowski.

Em 1973, outro experimento realizado por Ashkin e Dziedzic condizia com os resultados de Minkowski. Neste caso, um laser foi focalizado na interface água e ar. Como, de acordo com a formulação de Minkowski, o momento da luz aumenta com a entrada no líquido,

uma força deve atuar na superfície da água, levantando-a, para a conservação do momento. O que foi observado foi exatamente a superfície da água sendo levantada.

Walker, Lahoz e Walker, em 1975, realizaram um experimento que favoreceu a abordagem de Abraham, mostrando a existência de uma força prevista por sua abordagem, denominada força de Abraham.

Experimentos mostraram que a transferência de momento de fótons para portadores de cargas podem gerar corrente ou campo elétrico no semicondutor. Isso é condizente com a formulação de Minkowski, com a transferência de $n\hbar\omega/2\pi c$. Isso foi observado por Gibson em 1980.

Experimentos de 2005 conseguiram medir o momento transferido do fóton para átomos em um condensado de Bose-Einstein. Campbell e colaboradores puderam inferir que esse momento é $n\hbar\omega/2\pi c$, concordando com a formulação de Minkowski.

She, Yu e Feng em 2008 chegaram a resultados que confirmavam a abordagem de Abraham. Os experimentos tinham a mesma ideia de Ashkin e Dziedzic, porém chegou a resultados divergentes. A diferença consistia em o pulso de laser passar por um filamento para observar o comportamento deste após a saída do pulso. Se o momento da luz for menor dentro do filamento (e isso significa uma concordância com os resultados de Abraham) uma força para cima deve atuar no filamento. E foi exatamente isso que foi observado.

A Teoria da Caixa de Einstein foi uma teoria a parte, que muito contribuiu com a discussão estabelecida, uma vez que é útil no entendimento do momento ótico. Ainda assim, favoreceu a formulação de Abraham.

E, com resultados que foram favorecendo uma ou outra formulação, a comunidade científica ficou dividida, ao longo de décadas, por esses dois dilemas. O problema dos experimentos é que eles levam em conta um termo do momento, sendo sempre dividido em partes eletromagnética e material. Abraham e todos os experimentos que concordam com ele consideram o momento cinético enquanto Minkowski e seus “aliados” consideram o momento canônico.

3.0 – CONCLUSÃO

Nenhuma das teorias está completamente certa ou completamente errada. O que muda, na verdade, é o tipo de abordagem. Não há uma forma única para as densidades e fluxos de momento e energia eletromagnética em um meio material. Elas são complementares em relação à onda. O que muda em relação aos resultados é, portanto, a forma de abordagem desses conceitos, que, a princípio, pode ser arbitrária.

4.0 – REFERÊNCIAS

Bowyer, Peter. The momentum of light in media: the Abraham-Minkowski controversy. School of Physics & Astronomy. Southampton, UK (2005).

Saldanha, Pablo Lima. Interação da Luz com Meios Contínuos: Abordagens Clássica e Quântica. Universidade Federal de Minas Gerais (2010). Tese de doutorado.

Saldanha, Pablo. Division of the momentum of electromagnetic waves in linear media into electromagnetic and material parts, Optical Express, OSA (2010).

Barnett, Stephen M. Resolution of the Abraham-Minkowski Dilemma. PRL 104, 040401 (2010)