

## A NATUREZA DO MOMENTO ANGULAR ORBITAL DO FÓTON COMO PROPRIEDADE DA INTERAÇÃO FÓTON-MATÉRIA

*Daniel Souza Cardoso*

Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia Sul-Rio-grandense, Brasil

[danielcardoso@cavg.ifsul.edu.br](mailto:danielcardoso@cavg.ifsul.edu.br)

### RESUMO

Realizou-se uma breve revisão do estado da arte do momento angular orbital da luz (MAO) conceitualmente e no contexto da Computação e Informação Quântica, C&IQ, constatando que o processo de produção de MAO se traduz num comportamento induzido capaz para luz, mas que não se caracteriza como uma propriedade da natureza da luz. Verificou-se através do pressuposto teórico da conservação da energia mecânica do fóton em energia cinética rotacional, em meios heterogêneos, um MAO como propriedade da interação fóton-matéria. Apresentou-se um MAO induzido em meios heterogêneos, quantizado de acordo com o número de deslocamentos das franjas de interferência num interferômetro de Michelson, considerando o deslocamento do comprimento de onda pressuposto pela conservação da energia mecânica do fóton em meios heterogêneos.

**Palavras chave:** Momento angular orbital do fóton, C&IQ, Interferômetro de Michelson, emaranhamento quântico.

### 1 INTRODUÇÃO

O momento angular orbital (MAO) do fóton ganhou evidencia apenas nas últimas décadas, principalmente no promissor cenário da Computação e Informação Quântica, C&IQ. Contudo, o MAO do fóton surge como um efeito decorrente de arranjos experimentais que demonstram que o fóton é capaz de apresentar tal comportamento, porém não como uma propriedade frente à natureza do fóton.

Recentemente, [1], através da análise dos efeitos de refração, surge o pressuposto teórico onde o fóton apresenta o MAO na transição entre dois meios, como propriedade da interação fóton-matéria, na perspectiva da conservação da energia mecânica do fóton, em energia cinética rotacional. A verificação do pressuposto teórico é conduzida frente aos resultados e estimativas da literatura, em análise dos efeitos de interferências em interferômetros de Michelson, onde se constatou que a luz possui MAO inclusive no ar [2].

Neste contexto, realiza-se uma análise da natureza do MAO do fóton em meios homogêneos e heterogêneos, frente à literatura e na perspectiva da conservação da energia mecânica do fóton em energia cinética rotacional.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 ALGUNS ASPECTOS DA “PROVA EXPERIMENTAL DO SPIN DO FÓTON”

Na análise da dispersão de fótons em gases [7], analisando a despolarização do espalhamento, o autor constata que suas medições são favoráveis a teoria do spin, bem como que não haveria decréscimo energético para os fótons espalhados.

A análise proposta pelo autor não tratou especificamente da descrição do Spin do fóton, mas sim de sua verificação. Contudo, ponderou sobre a expectativa teórica, concordando com Dirac em que o momento angular do fóton deveria ser mais ou menos uma unidade de Bohr ( $\pm\hbar$ ). Segundo o autor, o prof. Bose já mencionava que o fóton portava além de uma quantidade de energia  $h\nu$  e momento linear  $h\nu/c$ , mas também um momento angular intrínseco  $h/2\pi$ .

### 2.2 O MOMENTO ANGULAR TOTAL DO FÓTON SEGUNDO A LITERATURA

A ausência da discussão do comportamento do momento angular orbital em livros de óptica é tratada como um descaso da literatura na discussão proposta em [3],

onde o autor sugere desde a metodologia de ensino à tópicos de conceitos teóricos consensuais.

Segundo [3], o momento angular orbital é um conceito recente e fundamental na óptica Física. O autor aponta que inúmeros estudos foram conduzidos nos últimos anos, seja na análise ondulatória através das frentes de ondas helicoidais ou na corpuscular, a qual se mostrou importante trazendo novas possibilidades para a informação quântica.

A partir da análise das descrições corpusculares e ondulatória, o autor apresenta um momento angular total para o fóton, dado por:

$$J = l\hbar \pm \hbar \quad (1)$$

## 2.3 ALGUNS ASPECTOS DO EMANHAMENTO DE ESTADOS DO MOMENTO ANGULAR ORBITAL DO FÓTON SEGUNDO A LITERATURA

Segundo [5], a luz polarizada apresenta um momento angular orbital  $l\hbar$  para cada fóton, onde o índice de emaranhamentos  $l$  é o modo de Laguerre-Gauss. Em acordo com o autor, a variação de fase num caminho fechado entorno do centro do feixe é  $2\pi l$ .

Em análise experimental, o autor descreve que um fóton ao difratar em fendas de difração, intuitivamente sofre um torque devido ao deslocamento de fase e apresentará um momento angular dado por  $l\hbar$ , onde o índice de emaranhamentos depende das ordens de difração  $n$  e  $m$ , tal que  $l = n\Delta m$ , permitindo que o modo de Laguerre concorde com o modo de Hermite-Gauss ( $\Delta m$ ), para uma difração de primeira ordem ( $n = 1$ ).

## 2.4 O MOMENTO ANGULAR ORBITAL (MAO) DA LUZ E A COMPUTAÇÃO E INFORMAÇÃO QUÂNTICA (C&IQ)

Os q-bits passam a ser elementos fundamentais para a C&IQ, pois em acordo com [9], os vetores de estado  $|0\rangle$  e  $|1\rangle$  que representam os estados fundamental e excitado formam uma base ortonormal no espaço vetorial, bem como estados da base computacional.

O MAO da luz, ou estado transversal, traz consigo expectativas para C&IQ, pois segundo [9], poderá tratar-se de uma propriedade tão importante quanto a polarização é para o C&IQ, ou talvez mais.

De acordo com Simpson, et al. (1997, apud [9]), o momento angular total para um fóton é dado por:

$$\left[ l + \sigma_z + \sigma_z \left( \frac{2kz_R}{2p + l + 1} + 1 \right)^{-1} \right] \hbar \quad (2)$$

Na equação (2),  $k$  é o número de onda,  $z_R$  a distância de Rayleigh,  $p$  é um mínimo entre os índices  $(n, m)$  de HG e  $\sigma_z = +1$  para quando a luz está circularmente polarizada, destrógira, e  $\sigma_z = -1$  para a polarização levógira. Sendo que no regime paraxial, onde  $kz_R \gg 1$ , a equação (2) é dada por:

$$(l + \sigma_z) \hbar \quad (3)$$

A equação (3) apresenta uma quantidade  $lh$  para o MAO e uma quantidade  $\sigma_z \hbar$  para o spin do fóton.

Segundo o autor, para constatar o MAO associado a um feixe, pode-se verificar o padrão de interferência com outro feixe para analisar sua singularidade de fase. Considerou a condução da análise através de um interferômetro de Michelson, no qual o padrão de interferência obtido utilizando uma máscara de LG pode ser encontrado na Figura 1. O modo fundamental ( $l = 0$ ), indica que o feixe não possui MAO e em  $l = 1$  e  $l = 2$  as franjas claras se bifurcam em duas e três franjas, respectivamente, onde o MAO é não nulo.

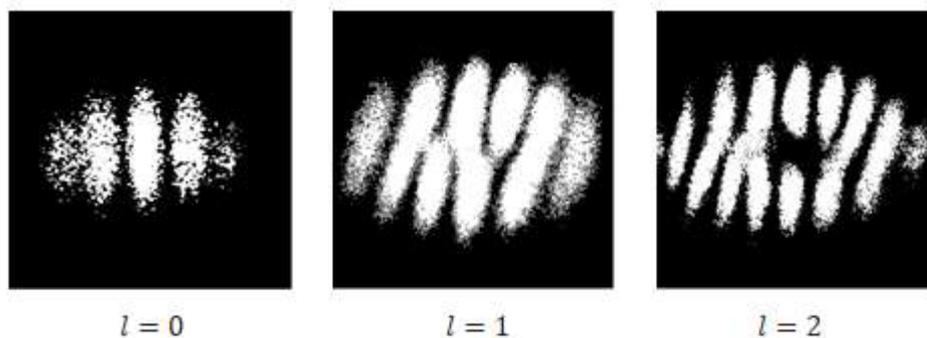


Figura 1 - Padrão de interferência num interferômetro de Michelson, com máscara LG, segundo [9]

## 2.5 O MOMENTO ANGULAR DA LUZ (MAO) AO ATRAVESSAR REGIÕES INTERESTELARES DE GRANDES DENSIDADES

Em acordo com [4], a luz ao atravessar regiões de grandes densidades fica suscetível a indução de um MAO.

Para visualizar o surgimento do MAO da luz em regiões não homogêneas, o autor sugere uma análise onde luz ilumina uma placa de fase. Após o feixe sair da placa de fase, o MAO é aproximadamente<sup>1</sup>:

$$\frac{s(n-1)\hbar}{\lambda} = m\hbar \quad (4)$$

Onde  $n$  é o índice de refração da placa,  $\lambda$  o comprimento de onda,  $s$  é o passo<sup>2</sup> da placa que pode ser expresso por um múltiplo:

$$s = \frac{m\lambda}{(n-1)} \quad (5)$$

## 2.6 ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE MAO DA LUZ, PARA UM ALVO DIELÉTRICO ROTANTE

Em [6], realiza-se uma revisão das previsões da transferência de momento angular orbital da luz para um disco dielétrico livre para rotar entorno do eixo ao qual está centrado, no momento da incidência. O autor discute os modelos segundo Abraham e Minkowski, onde apresenta que um tratamento Einstein-box da suporte a formulação de Abraham, onde o deslocamento angular do disco após a incidência do fóton é dada por:

$$\alpha_{Abraham} = l\hbar \left( n - \frac{1}{n} \right) \frac{s}{Ic} \quad (6)$$

Onde  $s$  é o comprimento do disco e  $I$  o momento de inércia do disco.

<sup>1</sup> A seguinte equação apresentada foi adaptada da apresentada pelo autor, [4], o qual apresentou como  $(n-1)\hbar/s\lambda = m\hbar$ , não satisfazendo a homogeneidade dimensional quando comparada com a equação (5). Em [8], o múltiplo  $m$  assume os modos de Laguerre-Gauss  $l$ .

<sup>2</sup> Neste estudo assume-se que o passo da placa corresponda a sua própria espessura.

Para análise que propõe este trabalho, a partir da taxa de  $\alpha_{Abraham}$  podemos apresentar o momento angular adquirido pelo disco, segundo a equação (6), após a incidência do feixe:

$$L_{Abraham} = \hbar n \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \frac{v}{c} \quad (7)$$

Onde  $v$  é a velocidade da luz ao longo de  $s$ . Usando a lei de Snell-Descartes ( $v/c = n_{vácuo}/n$ ), podemos escrever:

$$L_{Abraham} = \hbar \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \quad (8)$$

## 2.7 A TEORIA DA CONSERVAÇÃO DA ENERGIA MECÂNICA DO FÓTON, NA TRANSIÇÃO ENTRE DOIS MEIOS, EM ENERGIA CINÉTICA ROTACIONAL

Na perspectiva de [1], o fóton ao transitar entre dois meios, experimenta os efeitos da interação fóton-elétron que se traduzem na ação de um torque na interface separatriz, alterando seu estado de movimento angular. Diferentemente da interação fóton-elétron descrito pelo efeito Compton, em [1] o elétron antes da interação apresentava momentos linear e angular.

Segundo o autor, o fóton ao transitar por um meio mais refringente conserva parte de sua energia mecânica em energia cinética rotacional, onde a atenuação de sua energia cinética de translação é proporcional a variação do momento linear do elétron. Considerando a conservação do momento linear do sistema fóton-elétron, inferiu que a variação do comprimento de onda do fóton é dada por:

$$\lambda_f - \lambda_{f0} = \frac{h}{\sqrt{2m_e h v_f \left(1 - \frac{n_1^2}{n_2^2}\right)}} (1 - \sec \theta) \quad (9)$$

O deslocamento do comprimento de onda segundo o autor é inversamente proporcional a determinadas potências da energia conservada em energia cinética rotacional, predizendo que o MAO associado ao fóton após interação fóton-matéria é dado por:

$$L = 2\hbar \left( 1 - \frac{n_1^2}{n_2^2} \right) \quad (10)$$

## 2.8 A CONSERVAÇÃO DA ENERGIA MECÂNICA DO FÓTON, EM ENERGIA CINÉTICA ROTACIONAL, FRENTE À ALGUNS RESULTADOS E EXPECTATIVAS TEÓRICAS COM INTERFERÔMETROS DE MICHELSON NA LITERATURA

Um estudo foi conduzido em [2], verificando o deslocamento do comprimento de onda, segundo a teoria da conservação da energia mecânica do fóton em energia cinética rotacional apresentada em [1], frente à algumas estimativas e resultados da literatura de diagnósticos do número de franjas de interferência e seus deslocamentos, em análises e expectativas com o interferômetro de Michelson. O autor constatou que o deslocamento segundo o pressuposto teórico [1] mostra-se ajustado.

As estimativas do número de deslocamentos do número das franjas de interferência, em acordo com o pressuposto teórico [1], mostraram representatividade de resultados da literatura, com desvios percentuais entorno de -1,85% e -1,92%. Embora a representatividade da expectativa teórica fora de 93,6%, para a mesma situação-problema mostrou maior precisão na estimativa do índice de refração do ar a 1 atm à temperatura ambiente, quando comparado com o modelo da literatura.

O autor analisou a sensibilidade do número de deslocamentos das franjas de interferência em função do deslocamento do comprimento de onda segundo [1], onde verificou uma estreita faixa de diferenças adequadas, onde o deslocamento do comprimento de onda mostrou-se centrado, representando uma diferença da ordem de um pico metro. Pode-se dizer que ligeiras discrepâncias do deslocamento do comprimento de onda, o afastam das expectativas, o que por sua vez o qualificou o deslocamento segundo [1] no estudo.

Segundo o autor, o pressuposto teórico [1] permite dizer que a luz conserva parte de sua energia em energia cinética rotacional inclusive no ar, ao passo que o

deslocamento do comprimento de onda é inversamente proporcional a determinadas potências da energia conservada em energética cinética rotacional.

Em acordo com [2], o número de deslocamentos do número de franjas de interferência mostra-se mais ajustado considerando o deslocamento do comprimento de onda apresentado em [1], de forma que possa ser expresso por:

$$N = 2x \left( \frac{n_2}{\lambda_1 + \Delta\lambda} - \frac{n_1}{\lambda_1} \right) \quad (11)$$

### 3. METODOLOGIA

Considerou-se o consenso encontrado na literatura sobre o momento angular orbital do fóton (MAO), e os recentes estudos sobre a conservação da energia mecânica do fóton em energia cinética rotacional, para estabelecer um paralelo entre os MAOs encontrados em regiões homogêneas e heterogêneas.

Buscou-se reconhecer indícios de um MAO enquanto propriedade da natureza do fóton em meios homogêneos, antecedendo a interferência por medidas. Ponderou-se num comparativo entre polarizadores e os entendimentos do experimento de Stern Gerlach no que tange a perda de informação.

Introduziu-se o número de deslocamentos das franjas de interferência apresentadas em [2], para quantizar o MAO induzido em meios heterogêneos.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em análise do MAO considerado na literatura (seção 2.2), encontramos um comportamento apresentado pela luz por indução. Na seção 2.7, o autor apresenta um MAO natural resultante da interação fóton-matéria, verificando ajustado conforme a seção 2.8.

A existência de um MAO natural, como propriedade da interação fóton-matéria, transparece que o comportamento apresentado pela luz em redes de difração por produção, como muitas vezes tratado na literatura, retrata um processo de indução de polarizações. Os processos de polarizações analogamente ao que pode-se constatar na

experiência de Stern Gerlach, apagam a informação quântica antes da polarização, não permitindo prever o MAO natural associado a um feixe antes da medida.

Analisando a equação (8), ao passo que o índice de refração do vácuo é apresentado na forma numérica 1 (um), verifica-se grande concordância entre a Teoria de Abraham (seção 2.6) sobre a transmissão de momento angular entre a luz e dielétrico, com a Teoria da conservação da energia mecânica do fóton em energia cinética rotacional (seção 2.7), em que pode-se afirmar que são equivalentes quando a luz transita do vácuo para qualquer outro material. Vale dizer que na perspectiva da conservação da energia mecânica do fóton em energia cinética rotacional, a energia conservada em cinética rotacional é uma proporção da energia associada ao movimento do fóton no vácuo, onde  $n_1 = 1$ , tal que nestes caso particular:

$$\left(1 - \frac{n_1^2}{n_2^2}\right) = \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \quad (12)$$

Analogamente ao considerado na seção 2.5, porém invertendo as atribuições associadas a rotação, façamos uma placa cilíndrica de espessura  $x$ , com índice de refração diferente do convencional para o vácuo, seja  $n_2$ , estática em um dos braços de um interferômetro de Michelson, percorrida duas vezes por um feixe dotado de MAO, de forma que possamos dizer que em acordo com [2], a partir da equação (11):

$$2x \left( \frac{n_2}{\lambda_1 + \Delta\lambda} - \frac{n_1}{\lambda_1} \right) \hbar = N\hbar \quad (13)$$

A equação (13) indica que os estados  $N$  associados ao MAO da luz são dados pelo deslocamento do número de frajas de interferência num interferômetro de Michelson. Neste sentido, assume-se um efeito onde o MAO é induzido por variações do padrão de interferência.

Concordando com a literatura, assume-se que o momento angular intrínseco do fóton seja dado por uma unidade de Bohr, onde o momento angular total devido a transição da luz em meios não homogêneos, é dado por:

$$J = N\hbar \pm \hbar \quad (14)$$

Em meios homogêneos, o MAO induzido é representado pela equação (1):

$$J = l\hbar \pm \hbar \quad (15)$$

Considerando o momento angular Abraham a partir da equação (8) e expressando em termos dos modos de Laguerre-Gauss apresentados na equação

**Erro! Fonte de referência não encontrada.**, vamos representar:

$$l_{Abra} = l_{Lag} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \quad (16)$$

Os modos de Laguerre-Gauss,  $l_{Lag}$ , embora sejam designados/induzidos em acordo com o polarizador, passam a representar a proporção da energia mecânica dos emaranhados conservada em energia cinética rotacional.

Considerando a equação (13) na qual o deslocamento do comprimento de onda seja uma função da constante relativa entre dois meios, [1], podemos reescrevê-la da seguinte forma:

$$N = \frac{2xn_2^2}{\lambda_1} \left(1 - \frac{n_1^2}{n_2^2}\right) \quad (17)$$

Considerando que  $2xn_2^2/\lambda_1$  corresponde a  $2xn_2/\lambda_2$ , onde segundo [2] a razão entre o caminho óptico de Fermat e o comprimento de onda do feixe que o percorre duas vezes determina o número de comprimentos de onda neste caminho, que segundo o autor depende da frequência do fóton, da interação com a matéria e de sua conservação da energia em energia cinética rotacional, tal que:

$$N_2 = \frac{2n_2v_f x \sqrt{2m_e h v_f \left(1 - \frac{n_1^2}{n_2^2}\right)}}{h v_f \left(1 - \frac{n_2}{n_1}\right) + c \sqrt{2m_e h v_f \left(1 - \frac{n_1^2}{n_2^2}\right)}} \quad (18)$$

Embora a equação (18) seja reveladora, não resta dúvidas da simplicidade de expressá-la na forma de  $2xn_2^2/\lambda_1$ . De forma geral, reformulando as equações (14) e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, podemos descrever o MAO induzido em diferentes meios das seguintes formas:

$$J_{heterogêneos} = N_2 \left(1 - \frac{n_1^2}{n_2^2}\right) \hbar \pm \hbar \quad (19)$$

$$J_{homogêneos} = l_{Lag} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \hbar \pm \hbar \quad (20)$$

Na seção 2.5 apresentou-se a percepção do MAO da Luz em regiões interestelares numa perspectiva diferente dos polarizadores LG, bem como discutido neste trabalho e apresentado na equação (19). Não há como prever com  $l_{Lag} = 0$  que o MAO possa ser nulo antes das polarizações, as quais interferem no processo. Nesta perspectiva sugere-se que o MAO da Luz enquanto propriedade da interação fóton-matéria, possa ser compreendido no ajuste apresentado na equação (19).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão dos aspectos que consolidaram o MAO da luz nas últimas décadas, em alguns trabalhos que reportam a produção de comportamento, indicaram que o efeito é induzido em meios homogêneos e que não há predições do estado de MAO associado antes do emaranhamento.

Verificou-se que o pressuposto teórico apresentado em [1], onde o fóton conserva sua energia mecânica em energia cinética rotacional ao transitar em meios não homogêneos, ajusta-se a um MAO enquanto propriedade da interação fóton-matéria.

Na perspectiva de desta análise, o número de deslocamentos das franjas de interferência num interferômetro segundo [2], quantizam o MAO induzido em meios heterogêneos.

## 6. PERFIL DO AUTOR



### DANIEL SOUZA CARDOSO

Professor do Instituto Federal Sul Rio-grandense, Campus CaVG, atua no eixo ensino, pesquisa e extensão. Formado em Física e Mestre em Meteorologia.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CARDOSO, Daniel Souza, "**Theory of Conservation of Photon Mechanical Energy, in the Transition between Two Middles, in Rotational Kinetic Energy**", International Journal of Science and Research (IJSR), <https://www.ijsr.net/archive/v7i7/ART20183450.pdf>, Volume 7 Issue 7, July 2018, 810 - 815, DOI: 10.21275/ART20183450
- [2] CARDOSO, Daniel Souza. **A conservação da energia mecânica do fóton, em energia cinética rotacional, frente à alguns resultados e expectativas teóricas com interferômetros de Michelson na literatura.** Ciência e Natura, v. 40, p. e59, 2018.
- [3] GALVEZ, Enrique J.; ZHELEV, Nikolay. **Orbital angular momentum of light in optics instruction.** In: Education and Training in Optics and Photonics. Optical Society of America, 2007. p. ESB3.
- [4] HARWIT, Martin. **Photon orbital angular momentum in astrophysics.** The Astrophysical Journal, v. 597, n. 2, p. 1266, 2003.
- [5] MAIR, Alois; VAZIRI, Alipasha; WEIHS, Gregor; ZEILINGER, Anton. **Entanglement of the orbital angular momentum states of photons.** Nature, Volume 412, Issue 6844, pp. 313-316 (2001).
- [6] PADGETT, Miles; BARNETT, Stephen M.; LOUDON, Rodney. **The angular momentum of light inside a dielectric.** journal of modern optics, v. 50, n. 10, p. 1555-1562, 2003.
- [7] RAMAN, C. V.; BHAGAVANTAM, S. **Experimental Proof of the Spin of the Photon.** 1931.
- [8] SANTAMATO, Enrico. **Photon orbital angular momentum: problems and perspectives.** Fortschritte der Physik: Progress of Physics, v. 52, n. 11-12, p. 1141-1153, 2004.
- [9] SOUZA, Carlos Eduardo Rodrigues de. **Aplicações do Momento Angular Orbital da luz Computação e Informação Quântica.** 2010. Tese de Doutorado. PhD thesis, Instituto de Física-UFF, 2010. 20.