

Universidade Estadual de Campinas

Instituto de Física Gleb Wataghin – IFGW

Relatório Pré-Final

Projeto: Geração e Caracterização de Feixes de Vórtices Óticos

Aluna: Luiza R. Vilarta

1136758(arroba)dac.unicamp.br



Orientador: Prof. Dr. Luis E. E. de Araujo

araujo(arroba)ifi.unicamp.br



F690 – Iniciação Científica II

Dezembro de 2014

Resumo

Esse trabalho de Iniciação Científica possui o objetivo de explorar métodos experimentais para a geração e caracterização de vórtices óticos. O projeto inicial pretendia utilizar hologramas gerados por computador impressos e placas de fase ajustável. Entretanto, outro método mais eficaz (modulador espacial ótico) foi posteriormente explorado e ofereceu melhores resultados para a geração dos vórtices. A caracterização deles é feita através da observação do padrão de difração através de uma fenda triangular.

Introdução

Feixes de vórtices óticos são feixes de luz que possuem, intrinsecamente, momento angular orbital quantizado e dependência azimutal de fase $e^{im\varphi}$ em que m , a carga topológica do feixe, representa o número de vezes que a fase deste completou 2π em um círculo ao redor do eixo ótico [1]. Esse tipo de feixe foi introduzido por Nye e Berry em 1974 [2] e se fez presente no campo de pesquisa desde então. Diversas aplicações dos feixes de vórtice foram descobertas ao longo dos anos: são utilizados para girar e aprisionar micropartículas (devido ao seu momento angular intrínseco), criar estados de vórtices em Condensados de Bose-Einstein, emaranhar estados quânticos ortogonais, entre outros [3,4].

Feixes de vórtices podem ser caracterizados a partir de modos de Laguerre-Gauss (LG_{mp}), em que p corresponde ao número de modos radiais. Feixes de Laguerre-Gauss possuem, por fóton, um momento angular orbital $m\hbar$, enquanto feixes Gaussianos (que, em modos de Laguerre-Gauss, correspondem ao feixe $LG_{m=0,p=0}$) não possuem momento angular orbital. No caso desses feixes, a frente de onda pode ser descrita a partir de ondas planas, enquanto que em um feixe de Laguerre-Gauss a frente de onda é helicoidal, uma vez que é resultado da combinação entre a fase espacial $\vec{k} \cdot \vec{z}$ e a azimutal $m\varphi$.

Feixes de vórtices podem ser gerados a partir de elementos óticos estáticos, como hologramas gerados por computador (formados pelo padrão de interferência conhecidos como “grade de garfo” - ver Figura 1) [5], e placas difrativas de fase [6], ou programáveis, como moduladores espaciais óticos [7]. Esse último método foi explorado nos experimentos realizados para esse relatório.

Fizemos também tentativas de gerar vórtices também com a placa de fase espiral ajustável, antes de dar atenção ao modulador espacial óptico, porém os resultados não foram tão satisfatórios. Uma análise será realizada na seção “Análise de Resultados”.

A fim de caracterizar o vórtice (carga topológica e seu sinal), foi utilizada uma fenda triangular. Hickmann e colegas [8] demonstraram que, quando um feixe de vórtice incide sobre uma fenda triangular (cujo triângulo é equilátero), o padrão de difração é uma rede ótica truncada de pontos luminosos. O número de pontos nesse padrão de difração está diretamente relacionado com a carga topológica m e a orientação do triângulo com o sinal de m .

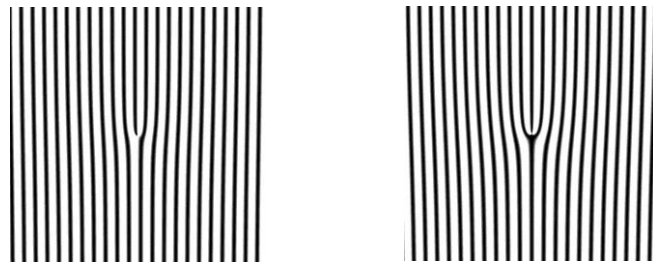


Figura 1: Grades de garfo para geração de feixes de vórtice ótico com carga topológica $m = 1$ (à esquerda) e $m=2$ (à direita).

Metodologia Experimental

Primeiramente, para montar o modulador espacial óptico, realizamos diversas modificações em um projetor SONY de modo a retirar uma das telas de LCD (dimensões aproximadas de 1cm x 1cm) de seu local original e coloca-la para fora do projetor, fixada em um poste para que pudesse ser inserida na montagem experimental. Conectores extras foram adquiridos para manter a tela de LCD conectada ao projetor. Outra parte do trabalho consistiu em construir uma fenda triangular com fita aluminizada sobre uma pequena placa de acrílico (5cm x 1,5cm) com três furos, de modo que os pedaços de fita foram colocados sobre os furos formando duas fendas triangulares com tamanhos diferentes: o triângulo da fenda maior possuía aproximadamente 2,5mm de lado e o triângulo da fenda tinha medida de lado um pouco menor 1mm.

A primeira montagem experimental foi realizada no laboratório do Departamento de Eletrônica Quântica. Um laser de He:Ne foi utilizado, além de um conjunto de polarizadores, filtros óticos, íris, o projetor modificado e a tela de LCD,

lentes, webcam e a fenda triangular. Entretanto, a montagem foi transferida para o Laboratório de Ensino de Óptica a fim de ser utilizada posteriormente pelos alunos que cursavam a disciplina F839 para realizarem o mesmo experimento de geração de vórtices. A montagem (ver Figura 2) contou com um laser de Nd:YAG, polarizadores (de aproximadamente 2,5 cm de raio), filtros óticos, íris, lentes objetivas (raios variando entre 2cm e 4cm), fenda triangular, webcam e o projetor com a tela de LCD. Um laptop ao lado da montagem foi conectado a um monitor auxiliar e esse monitor, por sua vez, foi conectado ao projetor. Desse modo, o que fosse colocado na tela do monitor auxiliar seria transferido para a tela de LCD. Vale destacar que os dois polarizadores da montagem foram ajustados de modo a ficarem cruzados. Desse modo, quando o LCD está desligado (tela preta no monitor auxiliar) a luz é bloqueada, e, quando está ligado (tela branca), o LCD gira a polarização da luz, que é então transmitida. O quanto a polarização é girada depende do grau de cinza na tela do LCD.

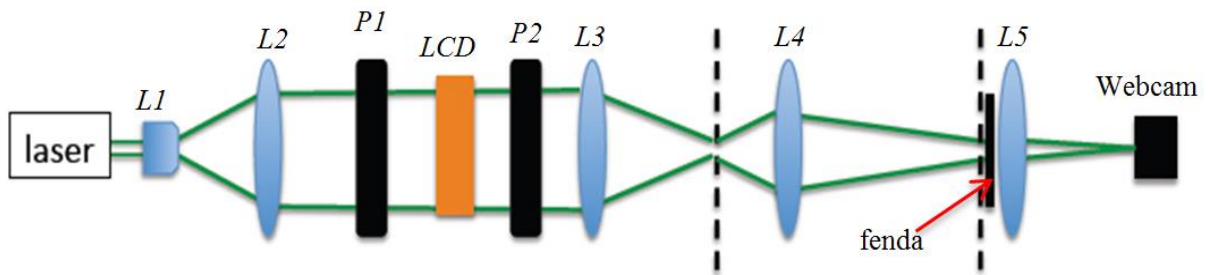


Figura 2: Esquema da montagem experimental realizada. L1, L2, L3, L4 e L5 são lentes objetivas, P1 e P2 são polarizadores cruzados e a fenda indicada é triangular. L1 e L2 formam um telescópio expensor de feixe que aumenta o diâmetro do laser de 2 mm para aproximadamente 40 mm. L3 foi utilizada para observações em que não era necessária a fenda triangular, L4 foi utilizada para amplificar (de um fator 4) o vórtice na fenda triangular e L5, para focar o padrão de difração na lente da webcam.

O professor Luis desenvolveu um programa em LabView que gera os hologramas e permite a fácil manipulação de posição, periodicidade da rede, apodização e carga topológica do vórtice. Esse programa foi instalado no laptop e as figuras dos hologramas gerados eram colocadas no monitor auxiliar, sendo transferidas para a tela de LCD que estava no caminho ótico do laser, o que gerou, por fim, bons vórtices.

Para caracterizar os vórtices gerados, utilizamos a fenda triangular. Destacamos que durante a montagem do experimento, encontramos algumas dificuldades e a mais significativa foi o tamanho da fenda triangular construída, que estava muito grande para que pudesse provocar qualquer tipo de difração no feixe. Por isso, utilizamos o

microscópio para colocar a fita aluminizada, deixando a fenda cada vez menor. Logo após a fenda foi colocada uma lente e, no foco desta, a webcam. Era possível fazer a análise dos vórtices no computador, uma vez que a webcam possuía um programa próprio que mostrava as imagens em tempo real.

Outro problema encontrado foi o fato de que, devido ao telescópio expensor (ver Figura 2) o laser ficou maior do que o LCD, fazendo com que o feixe fosse difratado pelo LCD. Para evitar isso, utilizamos uma íris logo após a lente L2 para diminuir o diâmetro do feixe para aproximadamente 10 mm.

A seguir, algumas fotos da montagem realizada no Laboratório de Ensino.

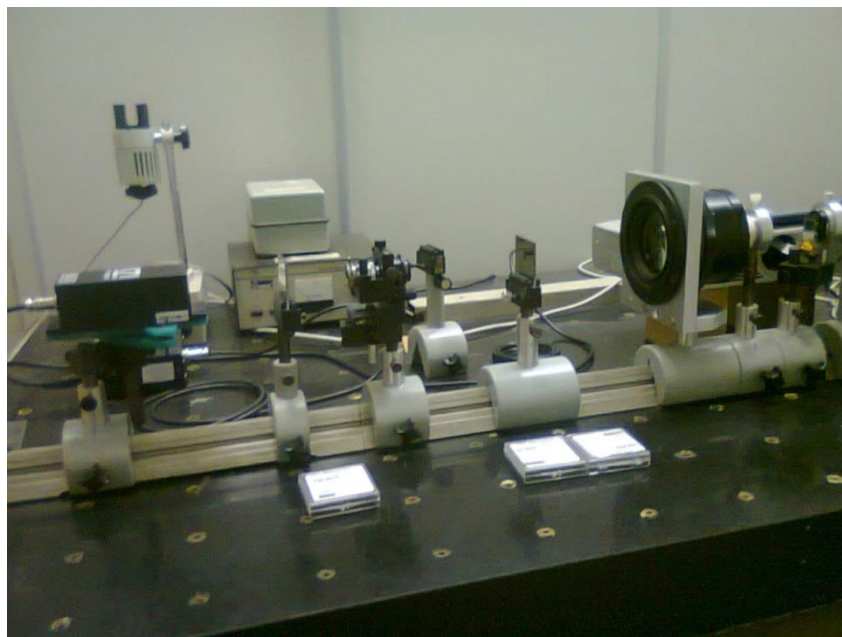


Figura 3: Montagem do experimento no laboratório de ensino.



Figura 4: Montagem do experimento no laboratório de ensino.

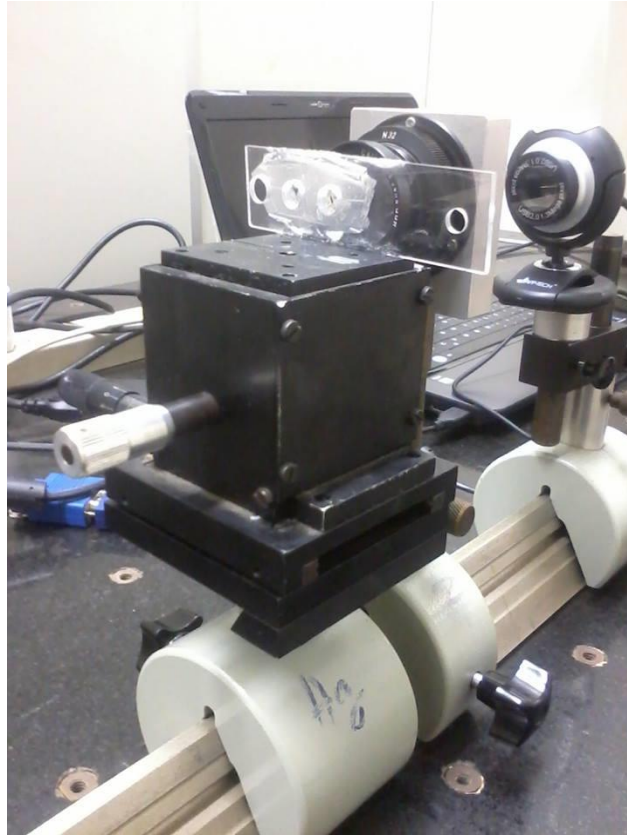


Figura 5: Detalhe da montagem experimental: fenda triangular e webcam.

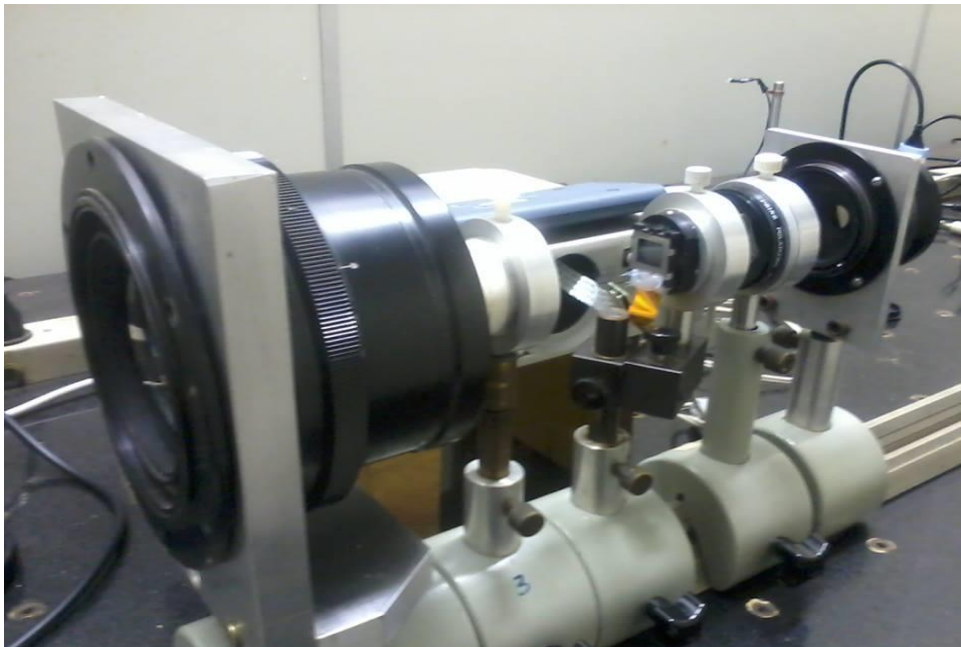


Figura 6: Detalhe da montagem experimental: Tela de LCD entre dois polarizadores cruzados, formando o modulador espacial de luz.

Como mencionado anteriormente, também trabalhamos com a construção de uma placa de fase espiral ajustável para a geração de vórtices. Dos materiais explorados para construir a placa, o que apresentou melhor resultado foram as lamínulas utilizadas em microscópios. Foram realizados diversos cortes nas lamínulas com diferentes objetos (tesoura, lâmina e bisturi) e de diferentes maneiras. Na montagem do experimento, após o feixe passar pela placa de fase, foi colocada uma webcam para registrar fotos dos vórtices. Os resultados foram diferentes do esperado, pois os vórtices não eram contínuos; apresentavam irregularidades (ver Figura 16), o que significa que talvez a carga topológica gerada pela placa não correspondia a um número inteiro.

Análise de Resultados

Antes de gerar os vórtices, fizemos alguns testes com outras fendas. No computador, desenhamos três tipos de fenda: simples, dupla e triangular. A webcam foi colocada no foco da lente L3 para registrar as imagens a seguir.

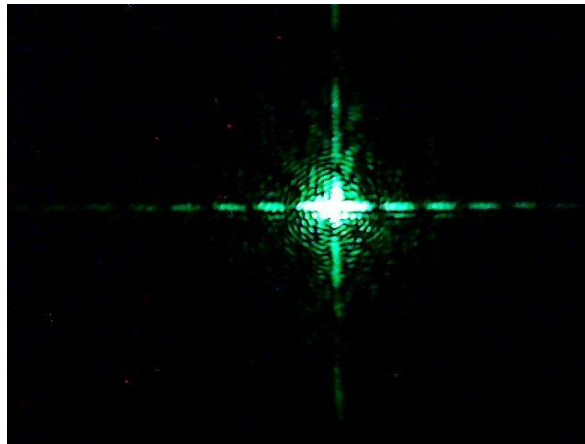


Figura 7: Padrão de difração do feixe ao passar por uma fenda simples.

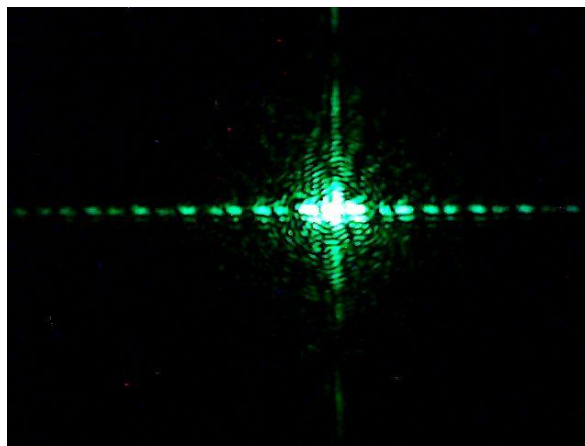


Figura 8: Padrão de difração do feixe ao passar por uma fenda dupla.

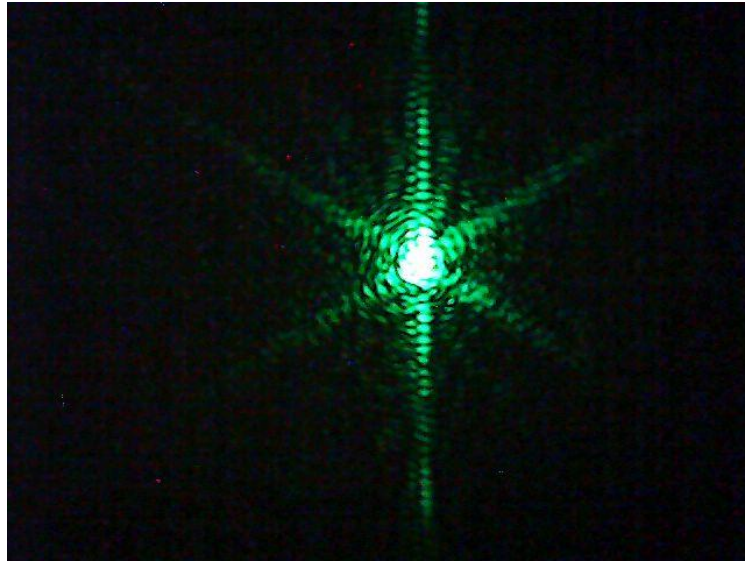


Figura 9: Padrão de difração do feixe ao passar por uma fenda triangular.

Os vórtices gerados a partir do modulador espacial ótico ficaram muito bons quando comparados aos vórtices gerados por outros métodos tentados anteriormente. As fotos a seguir foram tiradas com a webcam localizada no foco de L3 utilizada na montagem experimental.

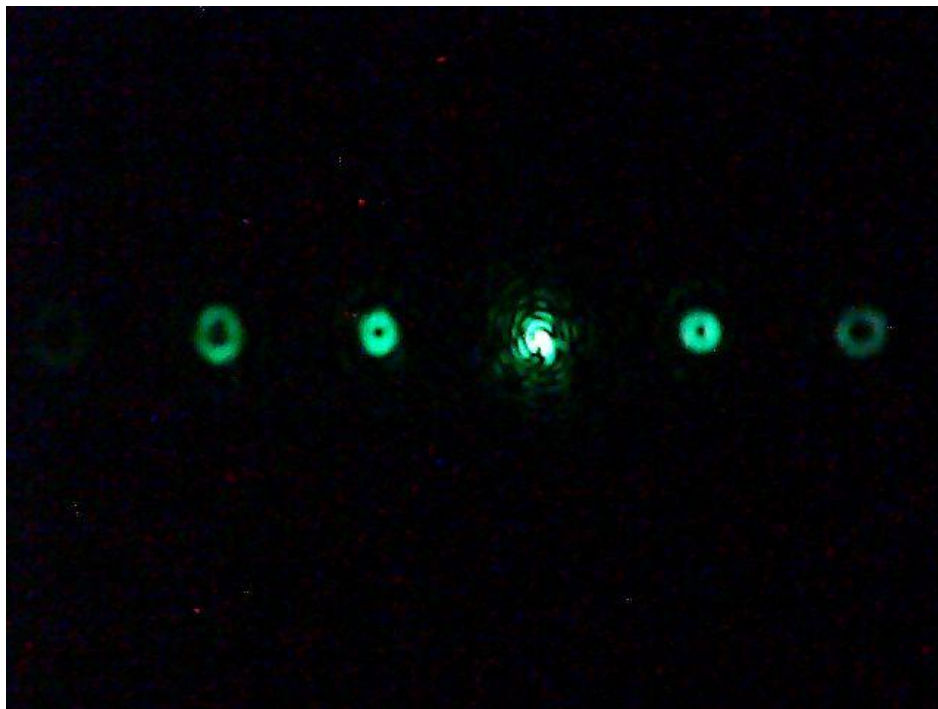


Figura 10: Vórtices gerados a partir do modulador espacial ótico. Carga topológica $m=1$.

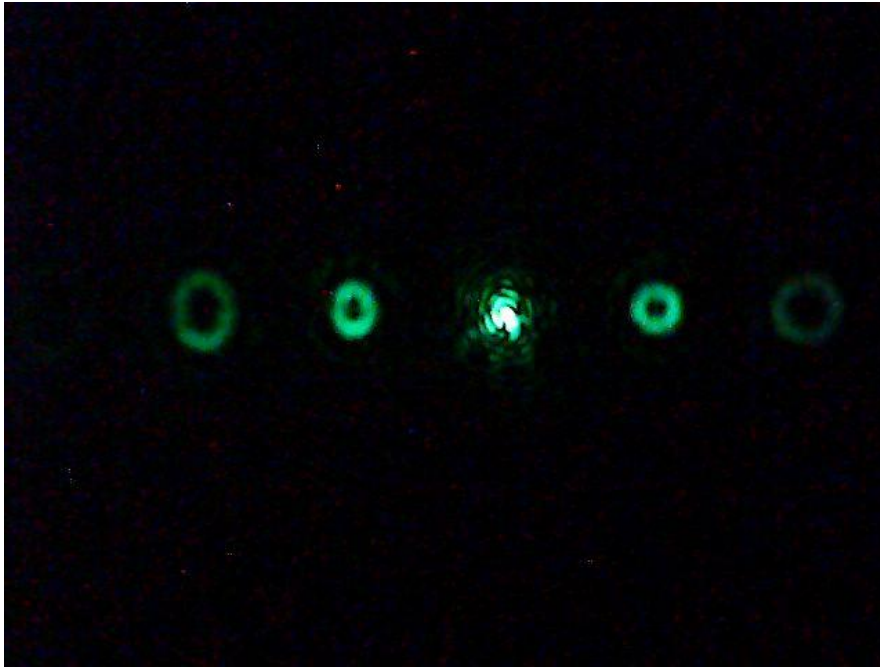


Figura 11: Vórtices gerados a partir do modulador espacial ótico. Carga topológica $m=2$.

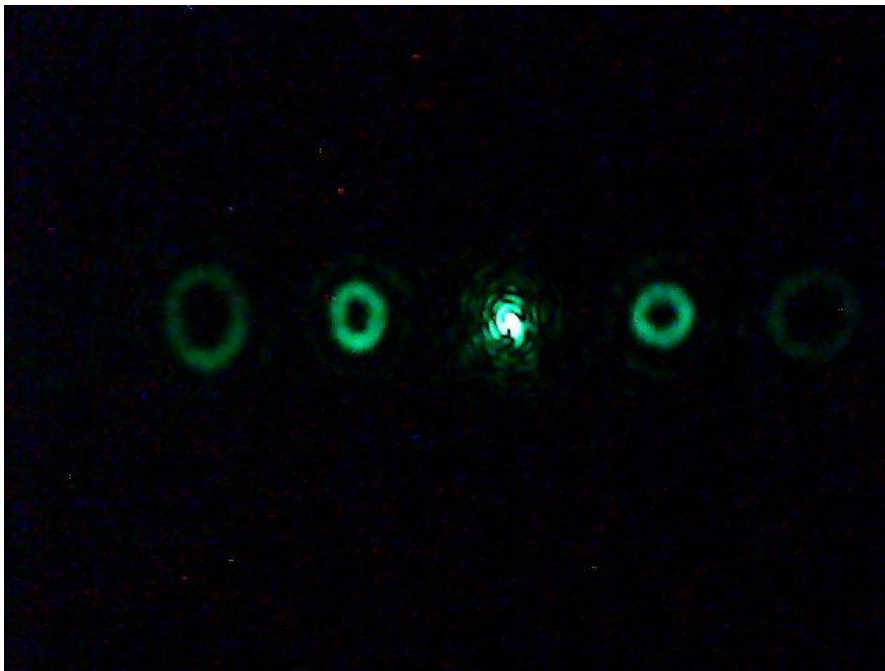


Figura 12: Vórtices gerados a partir do modulador espacial ótico. Carga topológica $m=3$.

Destacamos que só se sabe o valor das cargas topológicas dos vórtices acima porque o programa que gera os hologramas solicita o número da carga topológica desejada. Para descobrir a carga a partir de observação, deve-se utilizar a fenda triangular, como foi realizado para as imagens a seguir (com a webcam no foco da lente L5).

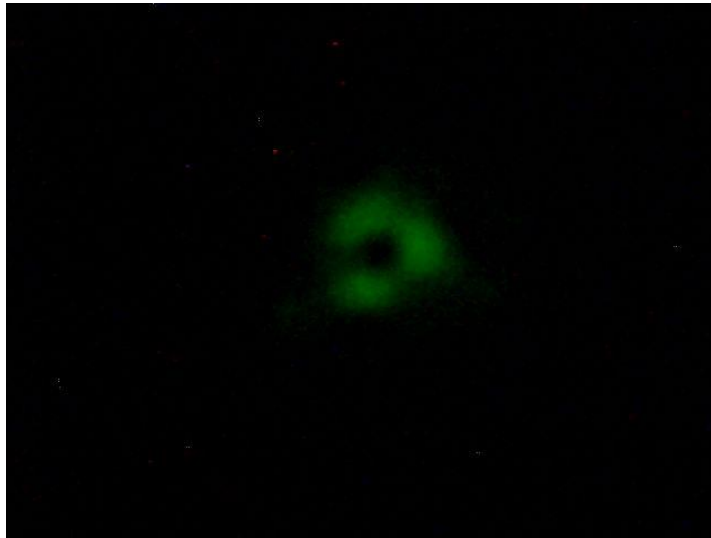


Figura 13: Padrão de difração do vórtice de carga topológica $m=1$ ao passar por fenda triangular.

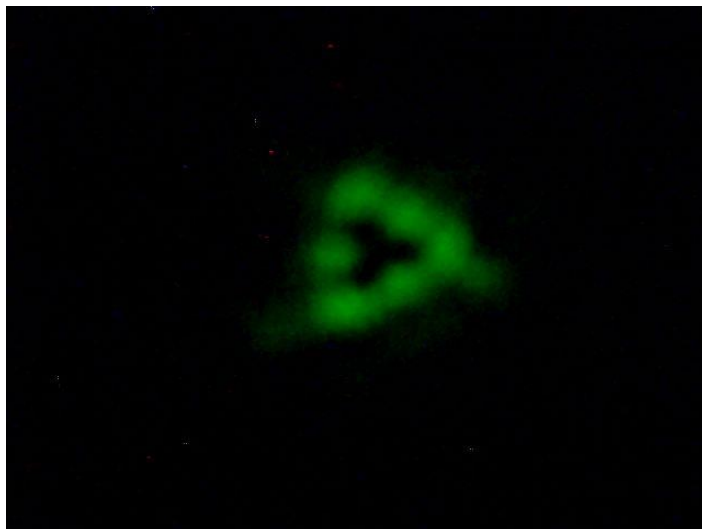


Figura 14: Padrão de difração do vórtice de carga topológica $m=2$ ao passar por fenda triangular.

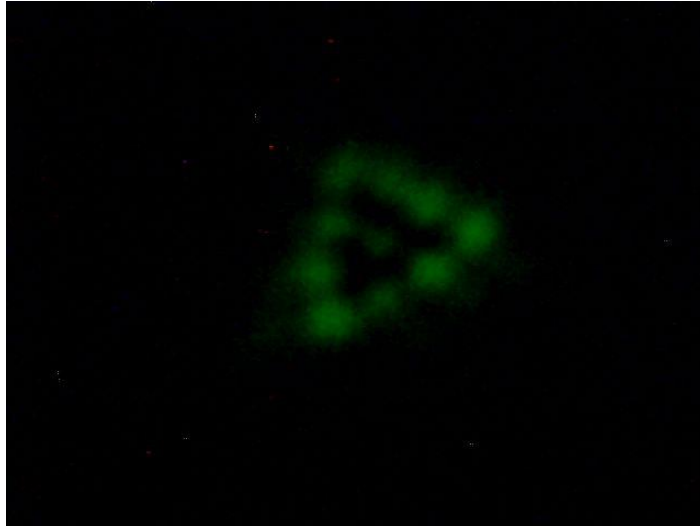


Figura 15: Padrão de difração do vórtice de carga topológica $m=3$ ao passar por fenda triangular.

A análise do número de pontos do padrão de difração permite descobrir a carga topológica do feixe. Por exemplo, no caso de uma carga topológica $m = 3$, os lados do triângulo externo são formados por quatro pontos (ou seja, $m + 1$ pontos); no caso de $m=2$, temos um triângulo formado por três pontos, e assim por diante.

A fim de comparar os vórtices gerados a partir do modulador de luz com os vórtices gerados pela placa de fase ajustável, apresentamos duas figuras destes últimos:



Figura 16: Vórtices gerados a partir de placa de fase espiral ajustável.

Conclusão

Concluimos que o método do LCD como um modulador espacial de luz para a geração de feixes de vórtices óticos trouxe resultados muito satisfatórios. É um método que permite a rápida alteração de fatores como periodicidade da rede, carga topológica,

etc., e possibilita a visualização das mudanças em tempo real. Além disso, pode ser utilizado para observação de outros fenômenos, como difração por fenda dupla. O método da caracterização dos vórtices através da fenda triangular também se mostrou satisfatório, com apenas um inconveniente que foi a dificuldade para ajustar o tamanho da fenda ao tamanho do feixe de forma que ele pudesse sofrer difração.

Em relação a melhorias no experimento, o projetor utilizado apresenta dois problemas: baixa resolução e baixo contraste. Apesar de funcionar muito bem para o Laboratório de Ensino, para o nosso laboratório de pesquisa ele é limitado. Um dos grandes problemas observados foi a pequena potência da luz incidente transferida para o vórtice. Adquirimos um novo projetor de alta resolução e alto contraste com o qual iremos refazer o modulador espacial de luz. Há vários pontos a serem otimizados. No projetor anterior, notamos que a eficiência de difração da luz pela grade mostrada na tela do computador não é linear com o grau de cinza, além de que o deslocamento máximo de fase introduzido pelo modulador era menor do que 2π . Esta dependência não-linear precisa ser levada em consideração na programação da grade. O programa desenvolvido utiliza uma grade simples do tipo senoidal. A eficiência de difração pode ser melhorada significativamente programando-se uma grade do tipo "blazed".

Opinião do Orientador e Comentários do Coordenador

Meu orientador concorda com o expressado nesse relatório e deu a seguinte opinião: “A aluna vem trabalhando com dedicação ao projeto, o qual tem se desenvolvido à cima das expectativas. Nosso objetivo inicial era a produção de vórtices óticos por holograma gerado por computador e placa de fase espiral. Como descreve no relatório, a aluna fez diversas tentativas para imprimir os hologramas em filmes de transparência, mas não conseguiu até o momento encontrar um filme adequado no qual a tinta aderisse de maneira satisfatória. Foi feita também tentativas de gerar vórtices pela placa espiral ajustável. Este último se mostrou o mais promissor dos dois, havendo sido gerados feixes com aparência de vórtices. Porém, estes vórtices não eram simétricos e, de fato, apresentavam muito estrutura em seu perfil. Tentativas iniciais de se medir a carga topológica com a fenda triangular não foram bem sucedidas.

Motivados pela proposta de se introduzir em F 839 um experimento com vórtices, optamos por seguir uma terceira alternativa não prevista no projeto inicial: adaptamos um projetor LCD de modo a construirmos um modulador espacial de luz.

Este caminho se mostrou bastante frutífero, levando à produção de ótimos vórtices, com carga topológica acima de $m = 10$, caracterizados com a fenda triangular. Com o modulador espacial de luz, ganhamos a capacidade de programar o vórtice gerado e produzi-lo em tempo real. Porém, o projetor utilizado tinha características que limitavam a potência difratada para o vórtice.

Um novo projetor foi adquirido com o qual pretendemos agora otimizar a produção dos vórtices. Sendo assim, nos próximos meses, a aluna irá trabalhar na montagem do novo modulador espacial de luz. Em paralelo, ela está aprendendo a programar em LabView de modo a poder fazer as alterações necessárias no programa que foi desenvolvido para o projetor antigo. Por estes motivos, acredito que o resultado final do projeto deverá ficar acima das expectativas iniciais.”

Comentários do Coordenador da disciplina, Professor José J. Lunazzi:

Sobre o Projeto: “Projeto aprovado. Bom trabalho! Vou querer comentar o caso da difração por CDs, que são elementos em espiral”.

Sobre o Relatório Parcial: “Aprovado. Mas precisa indicar dimensões dos elementos, e das figuras. Não comentou sobre o holograma desenhado, no que poderia usar também filme fotográfico de alto contraste”.

Referências Bibliográficas

[1] M. R. Dennis, K. O’Holleran, and M. J. Padgett, “Singular optics: optical vortices and polarization singularities,” in *Progress in Optics* (Elsevier, 2009), Vol. 53, pp. 293–363.

[2] J. F. Nye and M. V. Berry, *Proc. R. Soc. A* 336, 165 (1974).

[3] M. Padgett and L. Allen, *Contemp. Phys.* 41, 275 (2000).

[4] L. Allen, *J. Opt. B* 4, S1 (2002).

[5] A. V. Carpentier, H. Michinel, J. R. Salgueiro, and D. Olivieri, *Am. J. Phys.* 76, 916 (2008).

[6] C. Rotschild, S. Zommer, S. Moed, O. Hershcovitz, and S. G. Lipson, *Appl. Opt.* 43, 2397 (2004).

[7] J. E. Curtis and D. G. Grier, *Opt. Lett.* 28, 872 (2003).

[8] J. M. Hickmann, E. J. S. Fonseca, W. C. Soares, and S. Chávez-Cerda, *Phys. Rev. Lett.* 105, 053904 (2010).