



# **“Instrumentação para um estudo prático de feixes de Bessel”**

Orientador: Prof. José Lunazzi - lunazzi(at)ifi.unicamp.br  
Aluno: Juliano Carvalho Bento - jcarvalhobento(at)gmail.com

## 1. Introdução

Os feixes não difrativos pertencem à classe das chamadas ondas localizadas (Localized Waves, LW), as quais a princípio devem se propagar sem distorção por longas distâncias (muito maiores, que as chamadas convencionais) em meios não guiados lineares ou não-lineares. Um dos feixes mais simples pertencentes a essa classe é o feixe de Bessel de ordem zero, estudado por Durnin **(D)**. Considerando que esse feixe é uma solução modal da equação de onda eletromagnética no espaço livre, idealmente deveria se propagar infinitamente sem distorção, entretanto para sua geração, seria necessário utilizar uma abertura de diâmetro infinito, inviável na prática **(Miranda)**.

Os CDs usados domesticamente para ouvir música, ou para armazenar dados de computador, formam brilhantes figuras coloridas em sua “face espelhada”. Os CDs têm uma propriedade muito importante no estudo da ótica, a difração. **(Magalhães)**

Um dos dispositivos mais úteis para o estudo da luz e corpos que emitem e absorvem luz é a rede de difração. Neste dispositivo há inúmeras fendas, chamadas de ranhuras, podendo a chegar a milhares por milímetro, a luz só pode atravessar os espaços entre os sulcos que funcionam como fendas. As redes de difração são muito utilizadas para determinar os comprimentos de onda emitidos por fontes luminosas de todos os tipos, desde lâmpadas até estrelas **(1)**.

A dispersão da luz pode ser observada por meio da superfície refletora de um CD ou DVD. A superfície destes possui um rastro de sulcos em espiral da ordem de  $1\mu\text{m}$ . Esta, então, se comporta como uma rede de difração. Quando o CD é iluminado com luz branca, esta difratada e forma faixas coloridas que representam as figuras de difração associadas aos diferentes comprimentos de onda da luz **(1)**.

A motivação desse estudo, consta na tese do aluno do Professor Lunazzi, Daniel Magalhães, se percebe a medida do centro de um feixe de Bessel feito pela espiral de um CD. O trabalho de Ferrari **(2)** não indica, mas a tese de mestrado de Magalhães diz que seria de  $0,5\text{ um}$  a distância entre um mínimo e o primeiro raio de Bessel. O centro deveria ser escuro mas medir o

deslocamento com essa precisão é inviável. Ainda não aprendemos como calcular esse 0,5 um e se seria ou não proporcional à distância. Entendemos que o feixe brilhante tem também 0,5 um de diâmetro (um entre mínimos) e que ninguém (Ferrari et al. ou Lunazzi) mediu. Ele deve ser somado à extensão da fonte (diâmetro do feixe inicial ou após passar por microfuro).  
**(Lunazzi)**

O projeto, dessa forma, constará em analisar algumas das propriedades desse feixe na prática, e algumas situações ainda não desenvolvidas ou novidades em projetos desse feixe.

## **2. Resultados**

- Aprendi a alinhar um feixe de laser na precisão de microfuros e a observar a homogeneidade do feixe gerado.
- Entendi a limitação que a difração coloca na resolução de feixes luminosos, aplicável ao campo das imagens.
- Observei feixes Bessel em duas ordens, tanto projetados em tela como por visão direta (anéis).
- Medii o diâmetro utilizando um microscópio com base transladora de precisão.
- Utilizei um fotômetro.
- Revelei materiais fotosensíveis.
- Fotos tiradas com auxílio de uma câmera de iPhone 5.

## **3. Desenvolvimento**

### **a. Possibilidades de estudo**

Discutimos o tamanho que deve ter o centro de um feixe de Bessel feito pela espiral de um CD. O trabalho de Ferrari não indica mas a tese de mestrado de Magalhães diz que seria de 0,5 um a distância entre um mínimo e o primeiro raio de Bessel. O centro deveria ser escuro mas medir o deslocamento com essa precisão é inviável. Ainda não aprendemos como calcular esse 0,5 um e se seria ou não proporcional à distância. Entendemos que o feixe brilhante tem também 0,5 um de diâmetro (1 um entre mínimos) e que ninguém (Ferrari et al. ou Lunazzi) mediu.

Ele deve ser somado à extensão da fonte (diâmetro do feixe inicial ou após passar por microfuro).

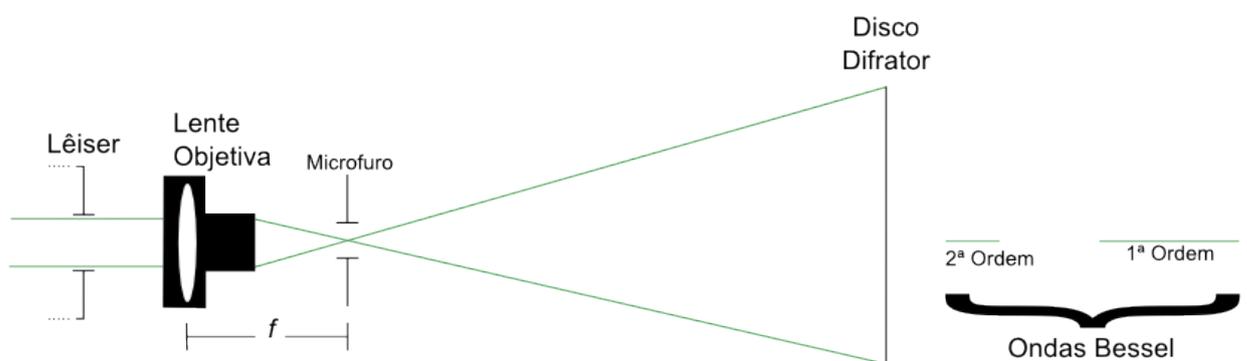
Com base nisso, duas possibilidades surgiram no estudo:

1ª) Pensamos em gerar um feixe de diâmetro mínimo com o menor microfuro com que contávamos, um de 1 $\mu$ m. E medir a intensidade deslocando outro furo de 1 $\mu$ m transversalmente por meio de um deslocador de precisão também da ordem de 1 $\mu$ m, com que contávamos. Mas não dispúnhamos do segundo microfuro de 1 $\mu$ m.

Utilizamos microfuros da marca JODON modelo MPA-5 do tipo múltiplo, vários em um substrato único, sendo o menor de 5 $\mu$ m. Um de 10  $\mu$ m poderia ser montado, e um sem indicação poderia ser o de 1  $\mu$ m com que contávamos.

2ª) Colocaríamos partículas de tamanho algo menor que o diâmetro do feixe e em suspensão, talvez encontraríamos que são expulsas radialmente pela rotação da fase do feixe. Esse segundo caso, ficou para uma próxima oportunidade.

Com base nisso, utilizamos um DVD sem as camadas refletivas dos dois, de forma a criarmos o experimento primeiramente proposto. O conceito foi o representado na Figura 1.



**Figura 1: Imagem Na primeira focalização pela objetiva de microscópio, embora a perfeição da objetiva, temos um círculo central resultante no foco, que vai ser projetado pela lente.**

O círculo central resultante no foco tem diâmetro  $2,44 \cdot \lambda \frac{f}{A}$ , onde A é a abertura do feixe leiser. Ao ser projetado pela lente, embora ela tivesse uma resolução e um círculo de difração bem menor, o que temos é um círculo maior que é a imagem da primeira focalização. É por isto que colocamos no experimento um microfurinho, para reduzir o diâmetro da fonte iluminadora (Fig. 1).

## **b. Desenvolvimento do Experimento**

Registramos o feixe em filme holográfico, que tem mais de 3.000 linhas/mm, para ver o filme em ultramicroscópio ou até em microscópio eletrônico. Isso sim permitiria resolver 0,5 um. Seriam feitas exposições com diferentes tempos. Pensamos primeiramente em utilizar o microscópio eletrônico da Profa. Lucila para medir registros em filme holográfico, contudo, alguns contratemplos foram obtidos nisso.

O Prof. Lunazzi apresentou os principais lasers do laboratório, em especial, dois vermelhos de gás, um de 50mW e outro de 35mW. Aproveitamos para ligá-los, pois, como o professor me informou, o simples fato de deixá-los ligados esteriliza os mesmo de gases prejudiciais para o aparelho (processo de adsorção pelo chamado “getter”) o, e, em alguns casos, consegue-se até mesmo resolver problemas intrínsecos ligando-os. Discutimos também sobre a classificação dos lasers e que o pai dos mesmos é Einstein. Discutimos também que num experimento com lasers, sempre se coloca uma lente colimadora onde se observa a transformada de Fourier quadrática, visto que a intensidade é ao quadrado, embora nos cálculos utilizamos somente a transformada de Fourier. Perguntou ainda “E se tirássemos essa lente? Ou seja, diminuíssemos um número de lentes, o que aconteceria?” Funcionaria igual, como indicado em artigo dele de 1982 [3] que pode ser justificado com a formulação adequada, onde o fator de fase quadrática da divergência da luz é compensado na focalização.

O Professor Lunazzi ainda comentou que optou por mudar os furos e parafusos do laboratório de polegadas (inglês) para milimétricos (francês), por conta dos materiais obtidos no Brasil, mas que trouxe alguns problemas, como,

por exemplo, quando se coloca um parafuso de polegada em rosca milimétrica, pode deparar ou acabar com a rosca. Tivemos um exemplo clássico, quando tivemos que chamar o técnico do laboratório para retirar de uma rosca da bancada um parafuso que havia sido colocado em rosca errada.

### **c. Início do Procedimento Experimental**

Construímos nesse dia o aparato para começar o experimento. Primeiramente o Prof. Lunazzi encontrou uma base com translação vertical da marca Optron **(4)** e repousamos o laser de diodo verde, de 50mW sobre o mesmo. Nesse momento o Prof. Lunazzi explicou como alinhar o feixe na bancada. Primeiramente, sem a objetiva e o microfuro, ligamos o laser e centralizamos o feixe no primeiro aro onde se encaixaria a objetiva, com o aro por onde passa o feixe onde estaria o microfuro. Uma vez centralizado os dois, instalá-se a objetiva e se observa a imagem e onde ela está se formando ao que instalamos o microfuro e buscamos por ajuste fino o máximo do feixe no microfuro.

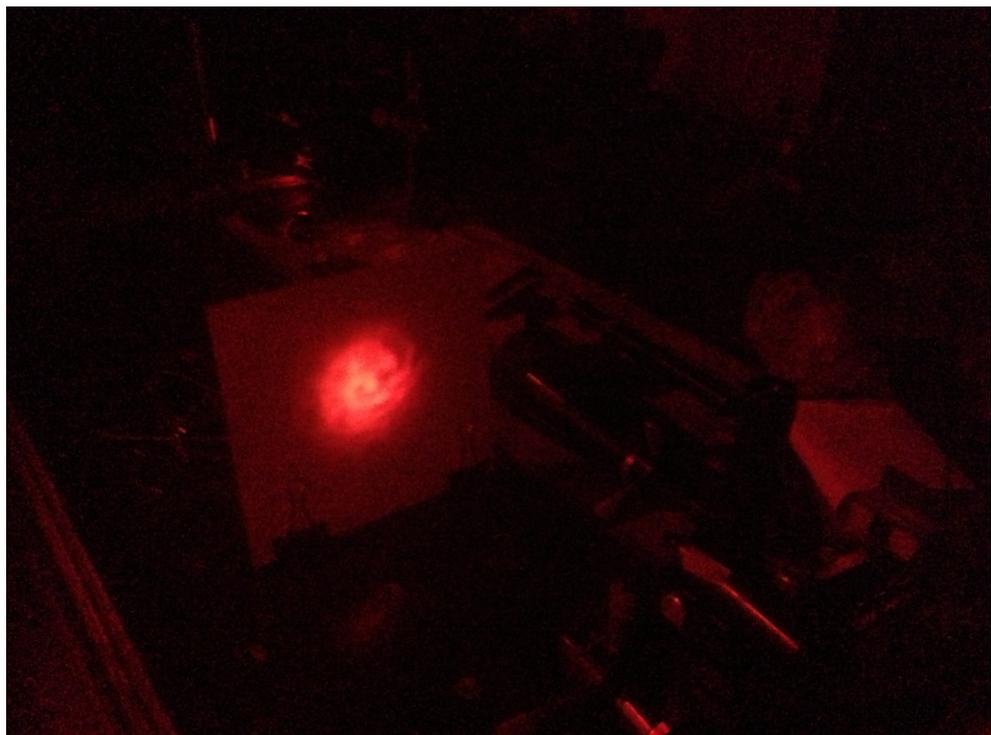
Contudo, alguns contratempos e ajustes tivemos que realizar. Primeiramente o laser estava somente repousando sobre a mesa, sendo que qualquer descuido, já desalinharía o feixe. Assim, o professor instalou o laser com fita dupla face enquanto eu busquei fixar o fio com um jogo de parafuso, porcas e um elemento que pressionava os fios. Outro problema que tivemos foi o da própria mesa na bancada estar escorregando, o que tivemos que improvisar alguns elementos para fixá-lo. Uma vez resolvido isso comecei a alinhar o feixe.

Nesse momento tive alguns problemas. Primeiramente o feixe estava muito baixo e o Professor, posteriormete disse que poderia haver uma inclinação em alguma parte do aparato que não estava visível no momento, mas que não prejudicaria o experimento. O professor percebeu essa inclinação somente comparando com a própria mão a altura do feixe. Assim subi a mesa e alinhava o feixe com um elemento reflexivo (plástico) para observar se o feixe estava centralizado. Por ser intenso,

irritava o olho, ao que o professor resolveu trazendo um óculos 3D, com a parte em vermelho minimizando o incomodo.

Um outro ponto que não percebi e que me tomou tempo foi quando elevei a mesa, alinhava o feixe e colocava a objetiva, o feixe desviava muito para direita, para baixo ou até mesmo para a esquerda, o que se devia ao fato, ao meu ver, do feixe não estar exatamente alinhado. Uma vez conseguido um alinhamento, ao encaixar o microfuro, consegui pelo ajuste fino achar o máximo do furo (colocando um papel preto perto), que se mostrava como um borrão, mas bem claro. Nesse momento o Professor disse que bastava agora regular a objetiva com o microfuro, de modo que conseguisse uma figura com a imagem.

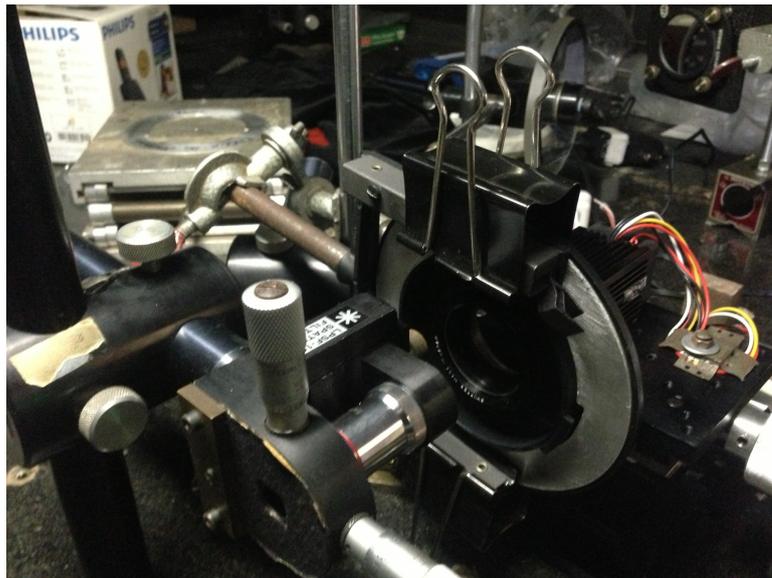
Com o ajuste fino da objetiva e do furo, achei o ponto máximo, e conseguimos, focalizando o feixe, uma figura que deveria ser homogênea, mas que ficou irregular. O Professor Lunazzi encontrou uma espiral no centro, que foi muito interessante, conforme constata na figura 1. Instalamos após isso o DVD para posterior captura.



**Figura 2: Imagem Elíptica formada com o microfuro de 25um (embora o láser seja verde, captamos com filtro vermelho a imagem acima).**

#### **d. Busca do centro escuro com gelatina dicromatada**

Pensamos em registrar com gelatina dicromatada, pois essa possui teríamos um registro fotográfico com sensibilidade no verde e resolução de 5.000linhas/mm. Assim comecei por buscar no laboratório um suporte fornecida pela Maira e pelo Carlos (Estudantes bolsistas do SAE), e adaptar o obturador mecânico da marca Polaroid já adaptado a algum suporte. Passado algum tempo consegui construir ambos:



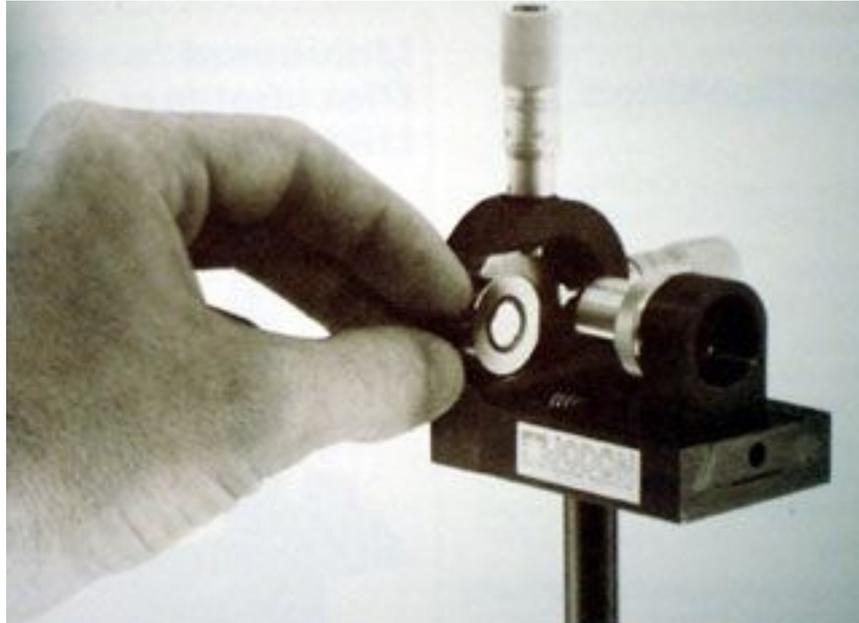
**Figura 3A: Suporte do obturador da marca Polaroid mecânico.**

Assim, podemos deixar o feixe passar em até frações de segundos. Uma vez montado, o professor notou alguns problemas ainda no feixe, ao que achou interessante colocar uma máscara de forma que se possa capturar somente o feixe. Assim, construí a máscara, achamos uma mesa para que conseguíssemos manipular a placa de gelatina com 3 graus de liberdade e instalamos o aparato, conforme abaixo:



**Figura 3B: Máscara construída e adaptada no aparato.**

Trabalhei, assim, na captura do feixe na placa com gelatina dicromatada. Realizei as medições na placa da esquerda para a direita na horizontal. As posições na mesa foram em tempos de abertura do obturador (ou seja, de exposição na placa) por milímetros na placa a partir da origem: 1s - 0mm , 1/2 s - 2 mm, 1/4 s - 4 mm , 1/8 s - 6 mm , 1/15 s - 8 mm , 1/30 s - 10 mm , 1/60 s - 12 mm , 1/125 s - 14 mm , 5 s - 16 mm , 10 s - 18 mm , 15 s - 20 mm.



**Figura 3C: Suporte do microfuro: posicionado pelo filtro espacial da marca JODON, modelo LPSF-100 (foto do arquivo pessoal do Prof. Lunazzi).**

Depois disso revelamos o a placa. O Carlos me ensinou a realizar, de acordo com o procedimento abaixo:

1) Depositar 50 ml de álcool isopropílico e 50 ml de água destilada na placa, tampar o pote e agitar por 5 min.

2) Após isso, descartar a solução e adicionar somente 100 ml de álcool isopropílico e agitar por mais 2min.

Assim teremos a revelação do filme.

Contudo, mesmo depois disso, não conseguimos detectar na placa nenhum ponto. Com isso o Prof. Lunazzi sugeriu utilizarmos filme holográfico.

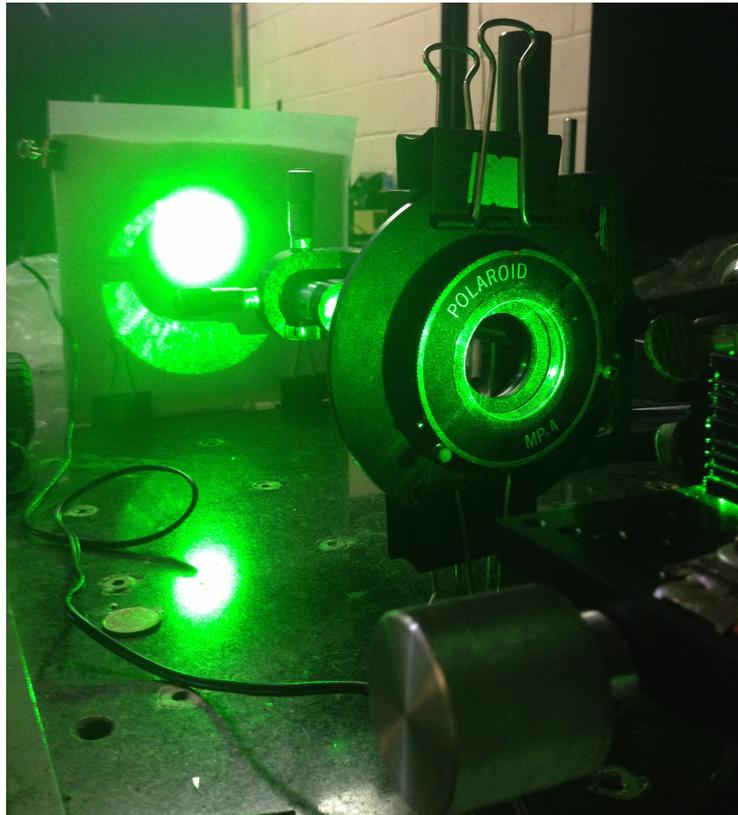


Figura 4A: Momento do alinhamento do feixe. Em primeiro plano, da direita para esquerda, o l iser, o obturador, lente objetiva e ao fundo, imagem da figura ainda sem o DVD.

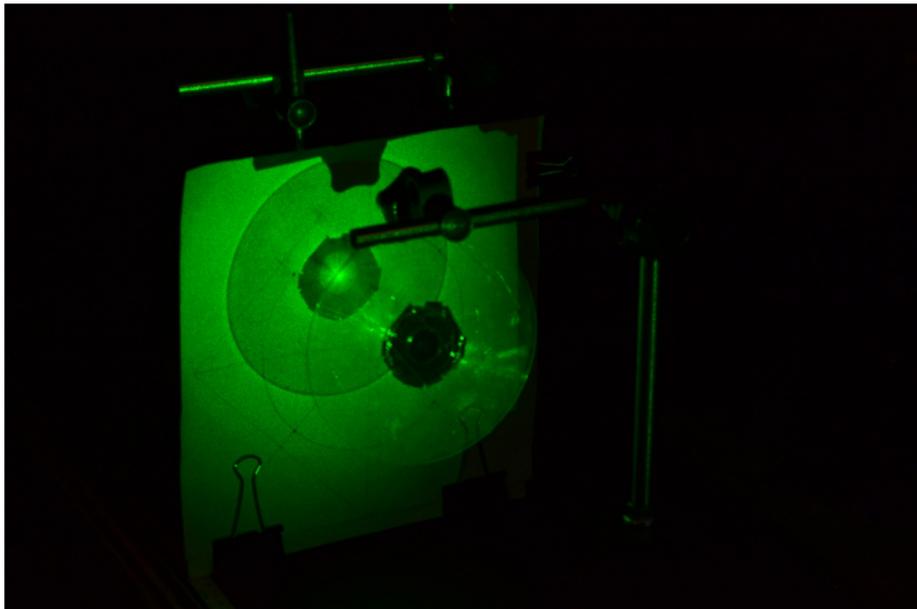


Figura 4B: DVD e anteparo. Ao fundo notamos no centro a região clara indicando luz proveniente da difrac o no DVD (foto do arquivo pessoal do Prof. Lunazzi).

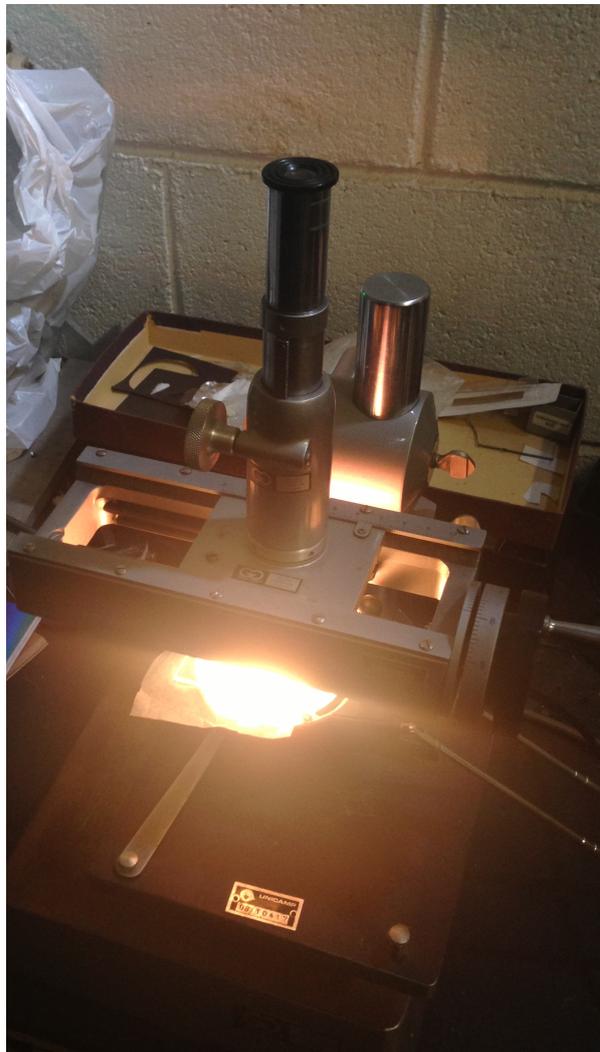
### e. Busca do centro escuro com filme holográfico

O professor, assim, ensinou como preparar um revelador de filme holográfico.

A partir de filmes holográficos, começamos o procedimento experimental. Assim, preparamos a solução reveladora, levamos o filme dentro da caixa até o laboratório somente com luz verde fraca e expusemos o feixe.

Depois disso preparei um anteparo para fixar o filme, de modo que conseguisse manipulá-lo no escuro, fiz a solução reveladora no laboratório e coloquei o filme, e incidi um para um tempo de abertura do obturador de 1s, 1/2s, 1/8s e 1/15s. Desta vez não utilizei a máscara conforme o professor sugeriu.

Revelei o filme e obtivemos a figura 3 e 4. A partir de um microscópio numa placa de vidro com fundo em papel manteiga.



**Figura 5: Microscópio com base transladora de precisão. Colocando-se uma lâmpada halogênica, rotacionamos o elemento de precisão e a luneta na busca do foco com a figura**

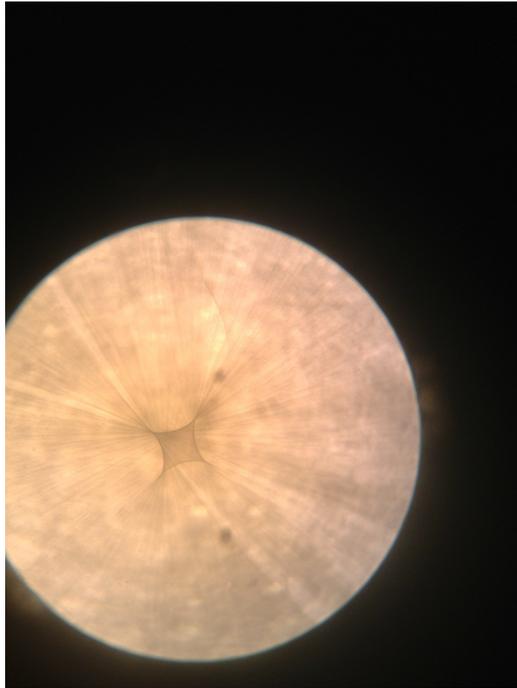
O professor argumentou que talvez a figura obtida fosse uma espiral detectada.



Figura 6: visão do microscópio. Imagens formadas parentam duas parábolas simétricas.

#### **f. Nova Busca do centro escuro com filme holográfico**

O professor analisou a imagem obtida no experimento passado. O que se esperaria seria uma figura com o ponto escuro no centro e não essa configuração. Com base nisso buscamos compreender o que estaria causando essa imagem. O professor sugeriu de inverter o DVD, e afastar a mesa para saber se observaríamos uma imagem melhor. Além disso, tentei focalizar melhor o feixe na objetiva de forma que se parecesse um disco homogêneo. Ao afastar o feixe e reaproximá-lo obtive a imagem em negativo do que o feixe estava capturando, obtendo a figura a seguir:



**Figura 7: Imagem após inverter o DVD, no microscópio**

Após o experimento, busquei medir o tamanho da figura. O tamanho de uma ponta a outra da figura acima ficou em aproximadamente 600 micrometros. A análise por parte do professor, indicou que talvez o círculo formado pelo laser, ao passar pela objetiva pudesse não estar uniforme. Por meio de um fotômetro, obtive que talvez isso pudesse realmente estar ocorrendo na área do círculo. O Professor então sugeriu de afastar todo o experimento para o máximo possível de uma das extremidades da bancada de forma a receber uma porção mais uniforme do feixe.

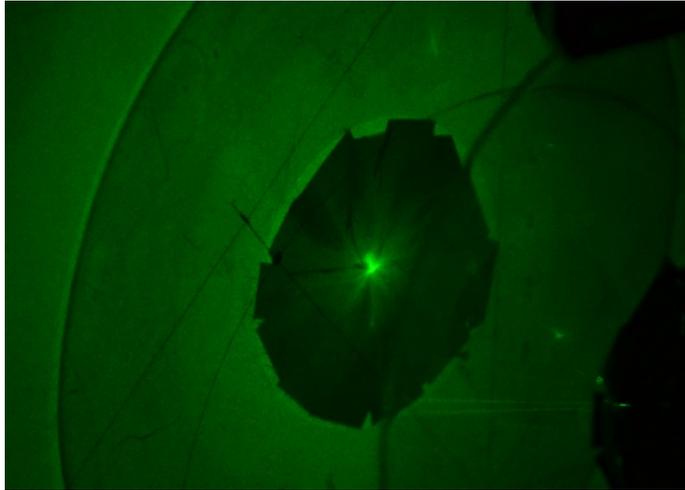
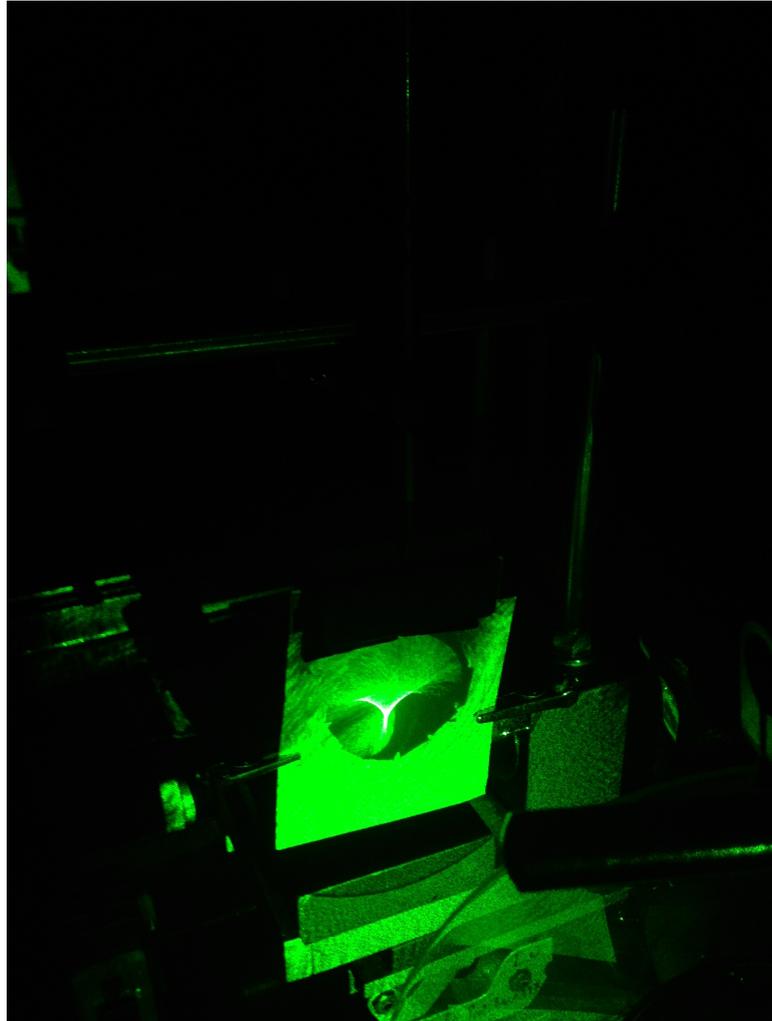


Figura 8: Feixe no papel com iluminação mais uniformizada (foto do arquivo pessoal do Prof. Lunazzi)

Remontagem e calibração do experimento, afastando a imagem de forma a compreender se obteremos o ponto desejado.

### **g. Problema do alinhamento para a incidência Perpendicular**

Após estabelecer as distâncias do DVD e do anteparo, percebemos que a figura continuava a formar imagens parabólicas. Quando, ao ajustar o DVD, percebi ainda que ao movimentar o DVD, as figuras ficavam maiores ou menores. Perguntando ao Professor, ele informou que na realidade o que ocorria era a falta de ajustamento do centro do DVD de forma a ficar perpendicular ao feixe. Ao realizar a correção por intermédio de um furo na parte branca que deveria coincidir com o tamanho do feixe, tivemos a visualização que o problema era esse.



**Figura 9: CD em ângulo, mostrando a figura capturada no microscópio em tamanho macroscópico .**

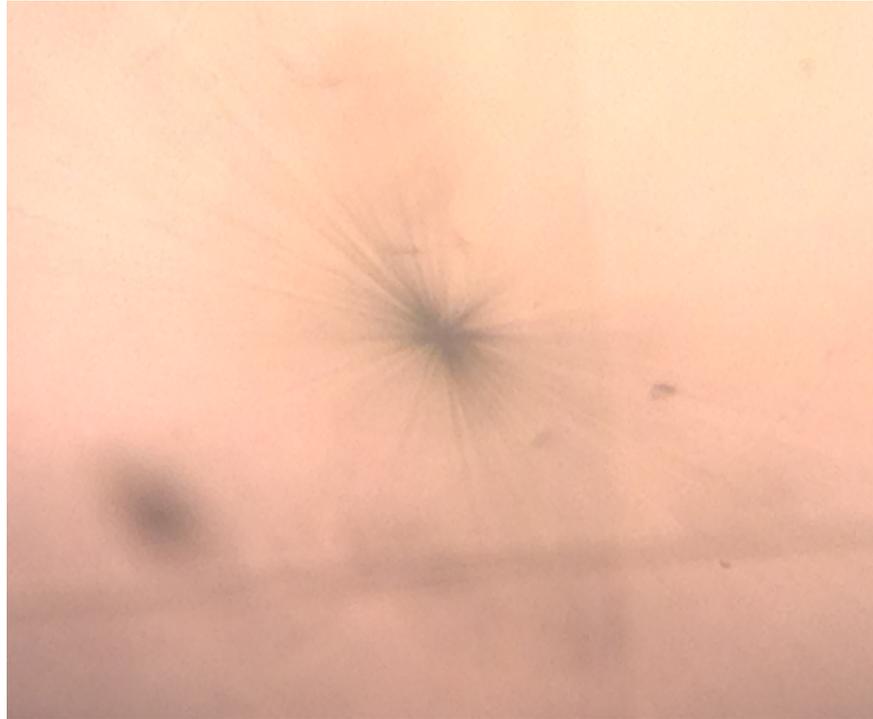
Após realizar medidas em filmes fotográficos, observamos que a figura ficava muito escuro, como se o filme tivesse queimado. Realizamos assim menor tempo de exposição, de  $1/30$  segundos, o que deixou a imagem no filme mais definida, embora com um contraste um pouco menor. A figura que obtivemos foi algo radial, bem diferente do que observávamos antes.

Analisando o experimento, observou-se que estávamos captando a segunda função de Bessel e não a primeira, portanto deveria colocar o filme o mais próximo possível do DVD (para também evitar problemas da irregularidade do centro que influenciava na imagem).



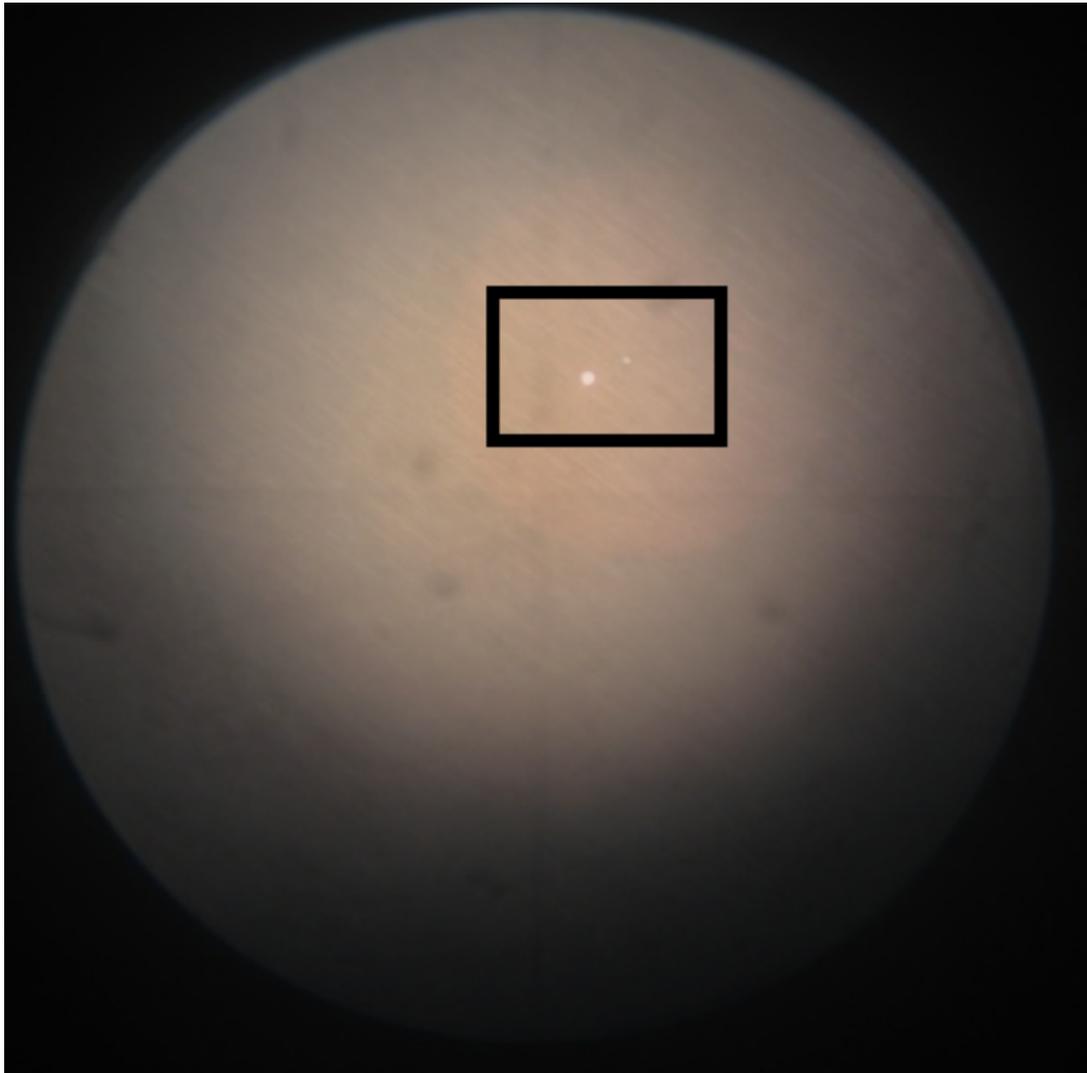
**Figura 10: Figura radial obtida após regularização da perpendicular do feixe com o DVD. Ela resulta da segunda ordem de difração, pois é gerada pela linha luminosa mais próxima do disco depois da primeira.**

Conforme sugestão anterior, obtivemos mediante exposição uma figura muito pequena, embora não seja radial e sim mais elíptica. (Figura 10)



**Figura 11: Figura radial obtida após regularização da perpendicular do feixe com o DVD.**

Como não se obtinha um ponto de referência no microscópio pelo mesmo ter um reticulado muito tênue e a figura ser bem pequena, medi um microfuro de 25 $\mu\text{m}$  e por justaposição de imagens tentar verificar se o que obtinha seja era algo muito maior que essa medida ou não. Analisando a figura observamos que o microfuro que considerávamos ser de 1  $\mu\text{m}$ , era, por comparação com o de 25 $\mu\text{m}$ , muito maior, da ordem de 15 $\mu\text{m}$ .



**Figura 12: Superposição da análise dos micro furos.**

Com microfuro de 15  $\mu\text{m}$  obtivemos um diâmetro de feixe bem maior que o que corresponderia ao microfuro. de isto pode-se concluir que, mesmo com furo menor, de 1  $\mu\text{m}$  por exemplo, teríamos um feixe de grande diâmetro e por consequência de falta de regularidade na periodicidade do disco difrator.

### **h. Captura das ordens dos feixes de Bessel**

Além disso, notamos também o fenômeno de difusão ocorrendo na Objetiva e a largura dos anéis representando as ordens do feixe de Bessel.

## DIFUSÃO

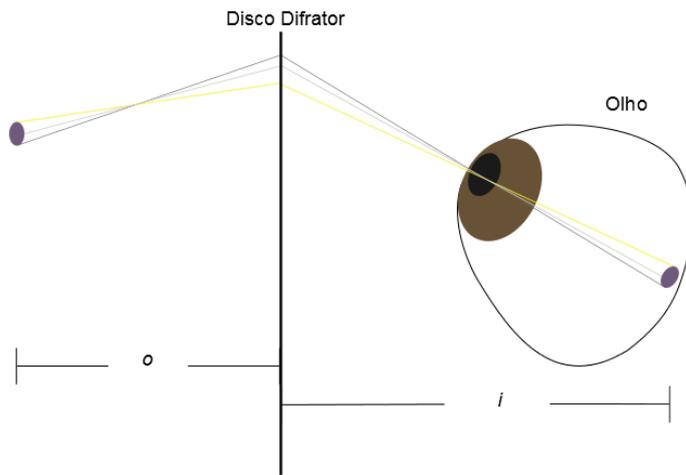


Figura 13: Representação da difusão da Luz no olho humano.

Capturamos também as ordens das funções de Bessel em um DVD, dispostas de uma câmera de celular, com o microfuro de 1  $\mu\text{m}$ .



Figura 14: Feixe de Bessel em sua ordem 1. Notamos nos cantos outras ordens se formando no DVD, mas que infelizmente, pela pequena abertura da câmera, não foi possível capturar em sua totalidade.



Figura 15: Feixe de Bessel em ordens maiores. Aqui distanciamos do DVD para capturar outras ordens.

#### 4. Conclusão

Embora a tentativa para achar o centro escuro, pelo fato do experimento não estar com o microfuro de  $1\mu\text{m}$  e este não ter sido achado até a data desse relatório, os avanços nos estudos dos feixes de Bessel continuam a nos surpreender frente as figuras formadas com o DVD em ângulo perante a normal do feixe que não esperávamos. Pude adquirir e aprender muito sobre instrumentação e um estudo melhor pode ser realizando criando novas proposições e descobertas que a literatura científica pode ainda não ter compreendido ou observado.

Além disso, colocar uma fina camada de água entre duas paredes de vidro (conforme sugestão do professor Lunazzi), para observar a espiral do feixe de Bessel, é algo que pode dar continuidade ao estudo e descobrir se partículas de luz escapam pela tangente.

Assim, as possibilidades de trabalho nesse tipo de experimento ainda estão longe de cessarem e são muito bem vindas a estudos posteriores.

## 5. Opinião do Orientador

O trabalho vem sendo realizado satisfatoriamente e o aluno está adquirindo uma boa prática com instrumentos ópticos de precisão

## 6. Referências

- **(D)** J. Durnin, J. J. Miceli Jr., and J. H. Eberly, "Comparison of Bessel and Gaussian beams," Opt. Lett. 13, 79-80 (1988)  
<http://www.opticsinfobase.org/ol/abstract.cfm?URI=ol-13-2-79>
- 
- **(Miranda)** Marco Antonio M. Miranda - Apresentação de Painel Pibic.  
<http://www.prp.unicamp.br/pibic/congressos/xviiiicongresso/paineis/062788.pdf> , acessado em 01 de abril de 2013 às 10h35min.
- **(Magalhães)** FEE, Hugo F. Figueroa. "Difração por CDs e ondas X."  
([http://www.ifi.unicamp.br/vie/F809/F809\\_sem1\\_2002/995025Daniel-Lunazzi-FigueroaRF.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/vie/F809/F809_sem1_2002/995025Daniel-Lunazzi-FigueroaRF.pdf))
- **(1)** Laboratório Básico I, código EN02085, turma 025047A, do curso de graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Pará.
- **(2)** <http://www.opticsinfobase.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-47-13-2201>
- **(3)**  
[http://www.sbfisica.org.br/v1/arquivos\\_diversos/SNEF/V/V-SNEF-Atas-Vol-I.pdf](http://www.sbfisica.org.br/v1/arquivos_diversos/SNEF/V/V-SNEF-Atas-Vol-I.pdf)
- **(4) Ref.** [www.optron.com.br](http://www.optron.com.br)
- **(TeseMagalhães)**  
<http://cutter.unicamp.br/document/?code=000467882>
- **(Lunazzi)** – Diário de Bordo  
<https://docs.google.com/document/d/17M19kQXPLc4YYjyYOiZ5FLmI-B8WHr1V7UjbCDbBBrg/edit> , acessado em 01 de abril de 2013 às 9h32min.