

Iniciação científica I – F590  
Prof. José J. Lunazzi

## **Espectroscopia de absorção saturada e transparência eletromagneticamente induzida em vapor atômico de sódio**

Relatório final de atividades (fevereiro de 2009)



Bolsista: Larissa Gaydutschenko  
Orientador: Luís Eduardo Evangelista de Araujo

Instituto de Física “Gleb Wataghin” – Unicamp

## 1. RESUMO

Durante o primeiro semestre de iniciação científica, estudei e implementei experimentalmente a técnica de espectroscopia de absorção saturada em vapor atômico de sódio. Pude observar e identificar as transições atômicas referentes às linhas  $D_1$  e  $D_2$  do sódio. Também foram observadas, para estas duas linhas, ressonâncias de transparência induzida eletromagneticamente.

## 2. INTRODUÇÃO

Os objetivos deste projeto de iniciação científica consistem em montar um experimento de espectroscopia de absorção saturada, seguido de dois experimentos de transparência induzida eletromagneticamente (EIT), todos sendo realizados com uma célula de vapor atômico de sódio.

A espectroscopia de absorção saturada é uma técnica muito utilizada para medir espectros atômicos de pequena largura. Aqui ela será utilizada para identificar transições do sódio e sintonizar os lasers nas frequências corretas. Consiste em enviar dois feixes de laser através de uma célula de vapor, em direções opostas. Um deles fraco (feixe de sonda) e o outro forte (feixe de bombeio). Possuem a mesma frequência, pois são extraídos do mesmo laser. Varrendo a frequência, a absorção do feixe é monitorada por um fotodetector. Para os átomos do vapor que estão com velocidade longitudinal nula em relação aos feixes, ambos os feixes, de bombeio e de sonda, estão em ressonância. Tais átomos absorvem os dois feixes e temos o espectro de absorção saturada, ou seja, um perfil Doppler largo, dado pela distribuição de velocidades no vapor atômico, com picos estreitos, correspondentes à absorção que ocorre para átomos com a velocidade paralela aos feixes nula. [1,2]

Já para o experimento de EIT [3] temos um feixe de prova que conecta o estado fundamental a um estado excitado e, quando não há feixe de acoplamento, é absorvido quando em ressonância. A intensidade do feixe de prova é fraca e não altera significativamente a população do estado fundamental. Quando o feixe de acoplamento está presente, com uma intensidade maior do que a do feixe de prova, aparece uma janela de transparência no centro da curva de absorção. Dois caminhos para absorção são criados, que interferem destrutivamente, cancelando a absorção do feixe de prova [3].

O relatório está organizado da seguinte maneira: na seção 3 a preparação para o início dos experimentos será descrita, ou seja, quais as dificuldades, problemas e soluções encontradas para completar o aparato experimental necessário ao projeto. A seção 4 aborda a implementação do experimento de absorção saturada e de seus principais resultados. A seção 5 trata do experimento de EIT. A seção 6 traz um resumo sobre os próximos passos do projeto e os novos objetivos e, finalmente, a seção 7 trata da conclusão. O parecer do orientador está na seção 8 e a bibliografia encontra-se na seção 9.

## 3. PREPARAÇÃO DA CÉLULA DE VAPOR DE SÓDIO

O primeiro objetivo do projeto era realizar espectroscopia de absorção saturada em vapor atômico de sódio. Enquanto estudava com mais cuidado artigos a respeito técnica [1,2], comecei a primeira etapa para o procedimento, ou seja, implementei o aquecimento da célula de sódio. Tal aquecimento se faz necessário para se obter uma densidade atômica alta o suficiente dentro da célula de sódio, para se observar um sinal espectroscópico. Isso porque o sódio apresenta uma pressão de vapor relativamente baixa à temperatura ambiente:  $2,5 \times 10^{-11}$  torr.

A célula de sódio consiste em um cilindro de vidro de 7,5 cm de comprimento e 2,5 cm de diâmetro, com janelas de quartzo. Além do sódio sólido, a célula contém 30 torr de gás "buffer" de neônio. Usando um fio resistivo de aço de espessura de cerca de 0,34 mm, fiz um

solenóide de aquecimento ao redor das extremidades da célula. Encapei uma grande extensão do fio de aço com fita teflon, material isolante e que atura bem altas temperaturas (até cerca de 260 °C), mantendo a espessura do fio praticamente igual. Na Figura 1(a) consta uma foto da célula já encapada com o fio resistivo, com suas dimensões especificadas em amarelo. Era preciso minimizar o campo magnético causado pela corrente que percorre o fio resistivo. O esquema de aquecimento envolveu um fio encapado que, tendo sido dobrado ao meio e novamente encapado, garantia ao ser enrolado sobre a célula que toda a corrente que percorreu o solenóide indo, percorreu o solenóide voltando. Dessa forma o campo magnético total permaneceu próximo de zero dentro da célula.

A configuração de aquecimento vista na Figura 1(a) foi obtida após uma série de tentativas. As primeiras tentativas consistiram em envolver completamente a célula com o fio resistivo. Isso se mostrou uma má idéia, já que o sódio acabava se acumulando nas janelas da célula, onde a temperatura era bem menor do que em todas as outras superfícies. Para resolver isso, foi necessário aquecer somente uma fração da lateral, bem próxima à janela, mantendo a região central mais fria e impedindo a acumulação de sódio nas janelas.

Como para o experimento de Hanle-EIT (ver projeto de iniciação científica) será necessário ter um solenóide que controle o campo magnético dentro da célula, mostrou-se necessário já levar em conta a interferência que esse solenóide exterior pudesse causar ao sistema de aquecimento. Por isso, fiz um solenóide utilizando um fio de cobre de espessura 0,4 mm, cobrindo um tubo de vidro que envolveria toda a célula, completando cerca de 600 voltas. Na Figura 2 temos uma foto do solenóide já pronto, bem como suas dimensões, também especificadas em amarelo.

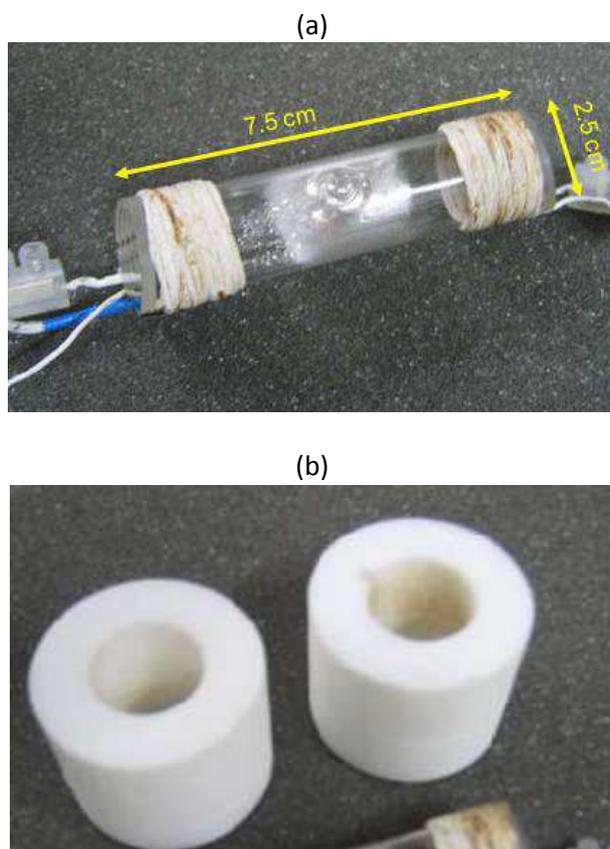


Figura 1: (a) Célula de sódio envolta pelo fio resistivo de aquecimento e (b) suportes de teflon.

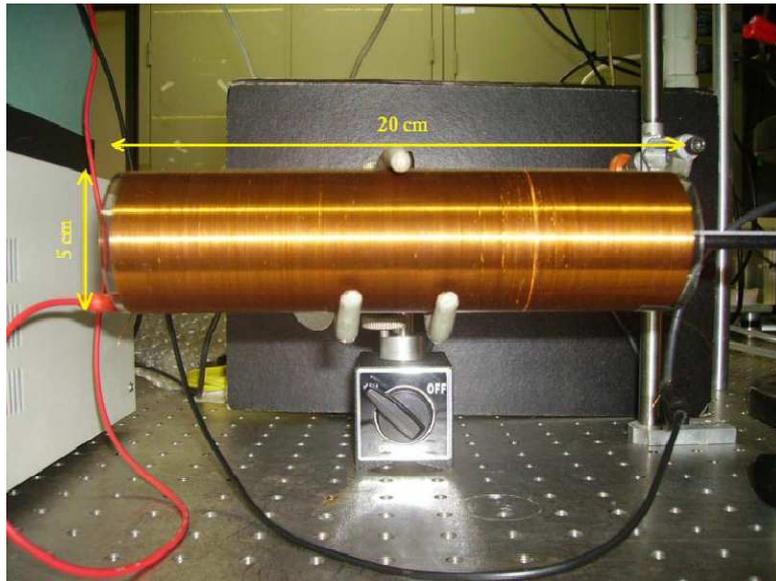


Figura 2: Solenóide para experimento de Hanle-EIT.

Para caracterizar o campo magnético gerado pelo solenóide na célula, realizei diversas medidas com um gaussímetro, tanto do campo em um ponto específico dentro do solenóide em função da corrente, quanto do campo magnético gerado em função da posição no eixo do solenóide, com a corrente constante. O solenóide, nesse caso, já estava encapado com o material  $\mu$ -metal [4], que isola a célula em seu interior de campos magnéticos externos que podem estar presentes. As medidas foram plotadas com a ajuda do programa Origin. Como a amplitude total do campo magnético necessária para o experimento de Hanle-EIT era maior do que aquela conseguida com a corrente gerada pelo gerador de funções que seria utilizado, completei mais 600 voltas e refiz a caracterização do campo. Podemos verificar a homogeneidade do campo obtido na Figura 3, um gráfico do campo magnético em função da posição da ponta de prova dentro do solenóide. Também consta, na Figura 4, a curva teórica prevista para o campo magnético em função da corrente aplicada (as medidas foram obtidas para o solenóide inicial de 600 voltas). O campo magnético teórico é dado pela fórmula:

$$B = \mu_0 \cdot n \cdot i, \quad (1)$$

onde  $B$  é o campo magnético,  $\mu_0$  a constante de permeabilidade magnética do vácuo,  $n$  o número de voltas do solenóide e  $i$  a corrente que percorre cada volta do fio [5]. Pelo gráfico fica claro que o campo magnético medido experimentalmente não fica muito distante da curva teórica esperada para um solenóide ideal, apresentando uma dependência aproximadamente linear com a corrente.

Para fixar a célula dentro da bobina, já pronta, utilizamos suportes feitos com teflon, que além de isolante elétrico é um bom isolante térmico. Na Figura 1(b) encontra-se uma foto dos suportes utilizados.

Com todo o suporte já preparado, preparei as primeiras medidas de temperatura em função da corrente para a célula de sódio. Elas foram coletadas usando-se um termopar preso a uma das janelas e aumentando periodicamente a corrente no fio resistivo. Para cada medida houve um tempo de espera até que a temperatura estivesse relativamente estável. Esse período foi de cerca de 20 minutos. Os dados obtidos também foram colocados em um gráfico, para obter a curva de temperatura em função da corrente, conforme fica explícito na Figura 5. Posteriormente um segundo termopar foi preso ao centro da célula, para que fosse possível monitorar a temperatura central. Em geral, a temperatura medida no centro foi cerca de 20°C mais baixa do que a temperatura medida nas janelas.

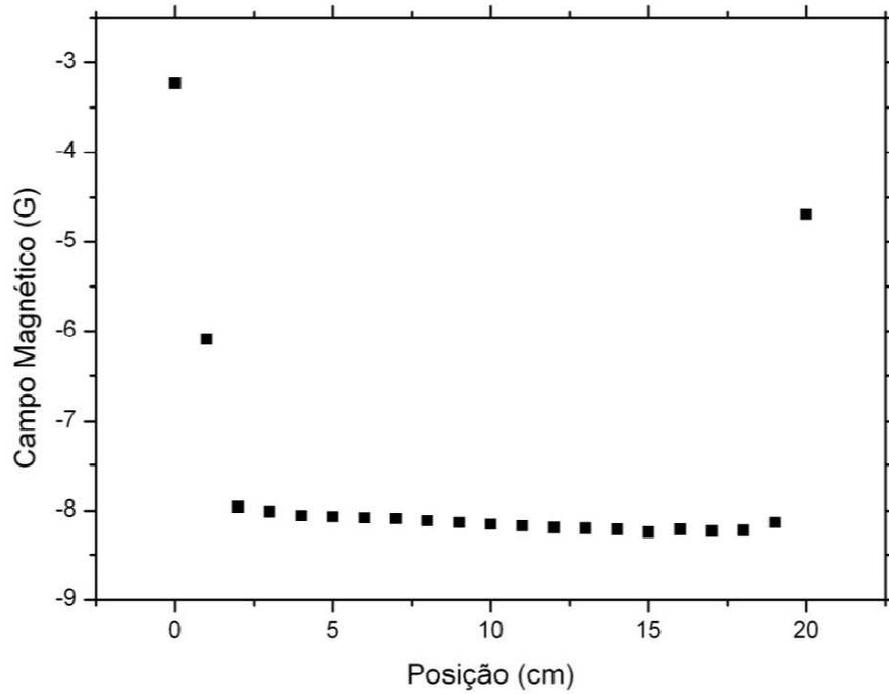


Figura 3: Campo magnético gerado em função da posição da ponta de prova do gaussímetro dentro do solenóide.

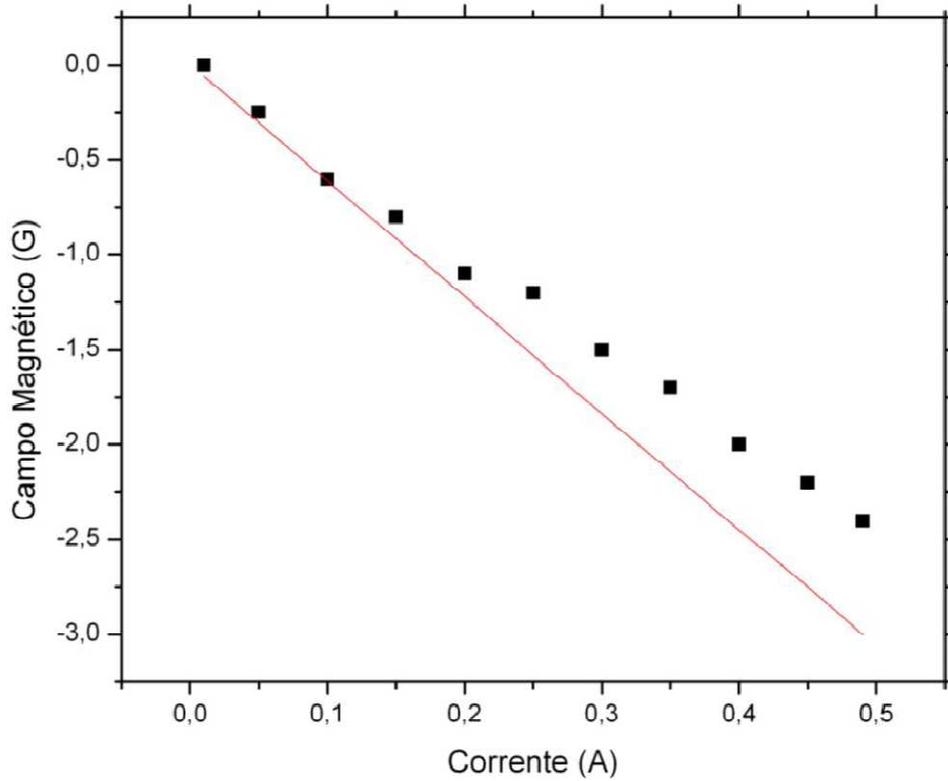


Figura 4: Campo magnético em função da corrente, curva teórica em vermelho e pontos experimentais em preto.

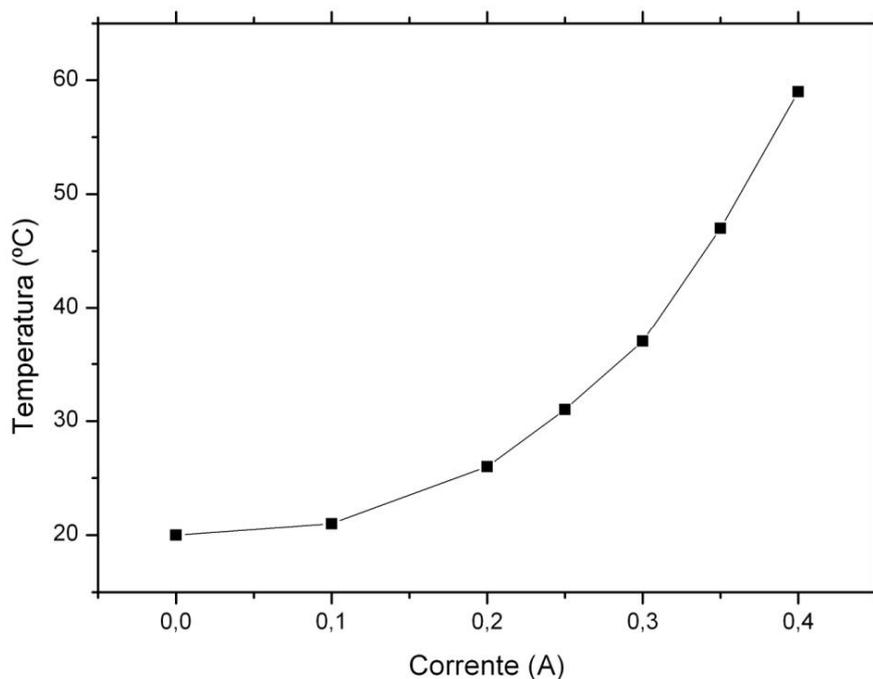


Figura 5: Temperatura da célula em função da corrente no fio de aquecimento. A linha sólida é apenas um guia para os olhos.

#### 4. ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO SATURADA

O átomo de sódio possui apenas um isótopo estável com massa atômica 23 e spin nuclear  $3/2$ . A transição atômica mais intensa entre os estados fundamental e excitado ocorre próximo a 589 nm. A Figura 6 mostra a estrutura hiperfina das transições  $D_1$  e  $D_2$  [4]. As transições óticas possíveis de ocorrerem são aquelas que obedecem à regra de seleção  $\Delta F = 0, \pm 1$ .

Para observar essas transições, passei para a montagem experimental na mesa ótica para o primeiro experimento, de espectroscopia de absorção saturada. Conforme a teoria [1,2], era preciso colocar dois feixes contra-propagantes, de diferentes intensidades, passando através da célula. Para realizar isso, contei com um dos lasers de corante Rodamina 590, já pertencentes ao grupo de lasers, que poderia emitir radiação no comprimento de onda específico das transições atômicas do sódio, conforme ajustado.

O esquema experimental utilizado consta na Figura 7. O laser de argônio bombeia o laser de corante, que tem seu feixe com potência de cerca de 500 mW e emite em comprimentos de onda em torno de 589 nm. Seu feixe é colimado por um “telescópio” formado por duas lentes  $L_1$  e  $L_2$  e é enviado para uma placa de meia onda. De lá, passa pelo beam splitter que divide o feixe em duas partes. Uma delas vai para o “wavemeter” (onde verificamos qual o comprimento de onda do laser). A outra parte é enviada através de uma placa de vidro, de onde seguem, com menor intensidade, dois feixes (feixes de prova) que passam pela célula. Um deles é alinhado de forma a ser contrapropagante ao feixe de bombeio, mais intenso, provindo da outra parte do feixe inicial que passou pela placa. A detecção desse feixe no fotodetector  $D_1$  fornece o espectro de absorção saturada. O segundo feixe de prova fornece o perfil Doppler de absorção dos átomos, conforme a Figura 8.

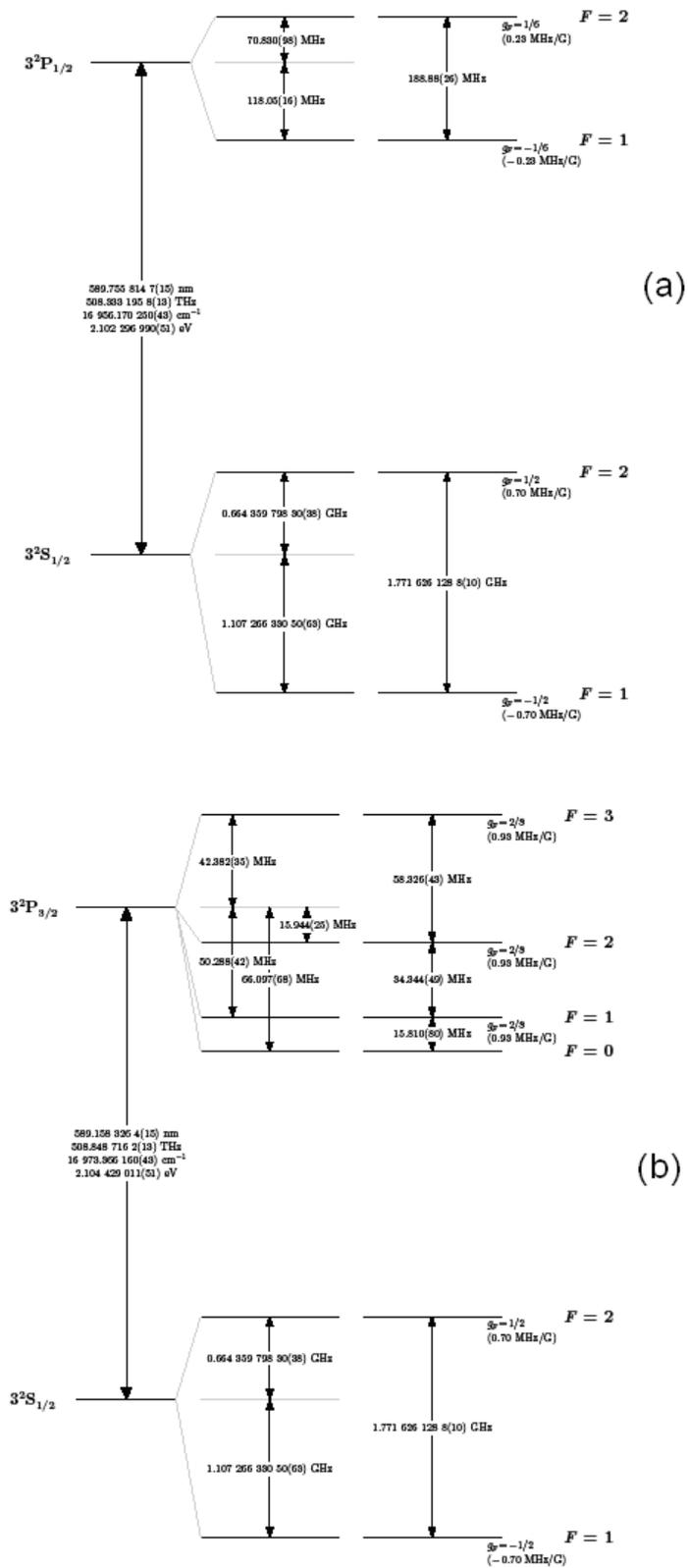


Figura 6: Estrutura hiperfina do sódio, linhas (a) D<sub>1</sub> e (b) D<sub>2</sub>, reproduzido da Ref. [6].

Com isso, colocamos o laser varrendo um espectro que variou entre 2 GHz e 10 GHz, e passamos para a obtenção das medidas. De acordo com a necessidade de precisão era necessário fazer uma varredura de espectro menor. O perfil Doppler largo que aparece nos espectros encontrados, devido à distribuição de velocidades no vapor atômico, contrasta com os picos finos causados pela absorção saturada, mostrados na Figura 9. Os picos correspondem aos átomos com velocidades longitudinais iguais a zero. Todos os outros átomos colaboram para formar o perfil Doppler, já que cada frequência da varredura do laser está em ressonância com uma parte dos átomos em movimento.

As Figuras 9(a) e 9(b) mostram espectros típicos obtidos para as linhas  $D_1$  e  $D_2$ . Na Figura 9(a) temos a linha  $D_1$  resolvida para o sódio, com o laser sintonizado em  $16956.17 \text{ cm}^{-1}$ , feixe fraco com  $300 \mu\text{W}$  e feixe forte com  $29 \text{ mW}$ , varredura em  $8 \text{ GHz}$  e temperatura de  $157 \text{ }^\circ\text{C}$ . Já na Figura 9(b) temos a linha  $D_2$  do sódio, com o laser em  $16973.00 \text{ cm}^{-1}$ , varredura de  $8 \text{ GHz}$ , feixe fraco com  $300 \mu\text{W}$  e de bombeio com  $29 \text{ mW}$ , e temperatura da célula de  $151 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para a linha  $D_1$ , conseguimos observar parte da estrutura hiperfina do estado excitado. A separação hiperfina ficou mais clara na ressonância de cross-over [1,2]. Para a linha  $D_2$ , não conseguimos resolver a estrutura hiperfina do estado excitado. Atribuímos esse fato à presença do gás neônio na célula utilizada. Colisões dos átomos de sódio com os do gás neônio tendem a alargar as larguras de linha das transições, reduzindo a resolução espectral. Da Figura 9, observamos que o espaçamento entre os estados excitados da linha  $D_2$  é bem menor do que o espaçamento entre os estados excitados da linha  $D_1$ . Por isso, é possível se observar parte da estrutura hiperfina da linha  $D_1$ , mas não na linha  $D_2$ . Para observar todas as transições da linha  $D_2$  uma nova célula foi providenciada, que não contém o gás "buffer".

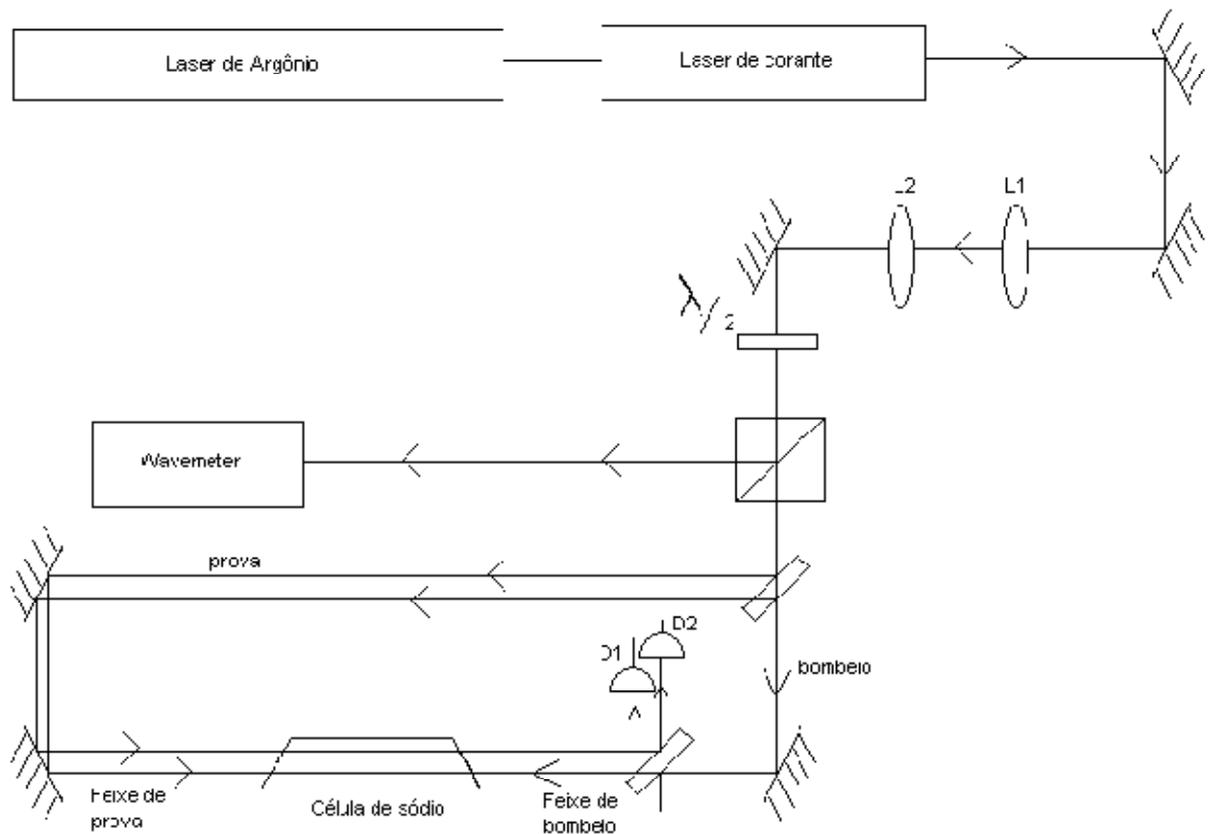


Figura 7: Esquema experimental para absorção saturada, onde  $L_1$  e  $L_2$  são as lentes,  $\lambda/2$  é uma placa de meia onda,  $D_1$  e  $D_2$  são dois detectores.

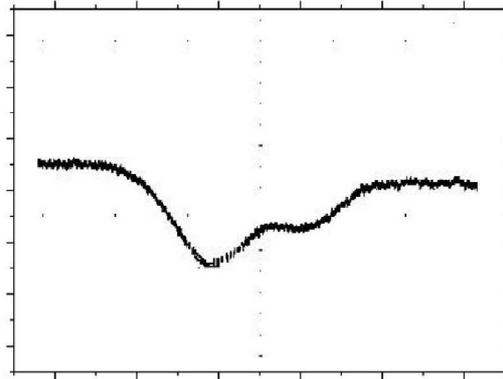


Figura 8: Perfil Doppler de absorção.

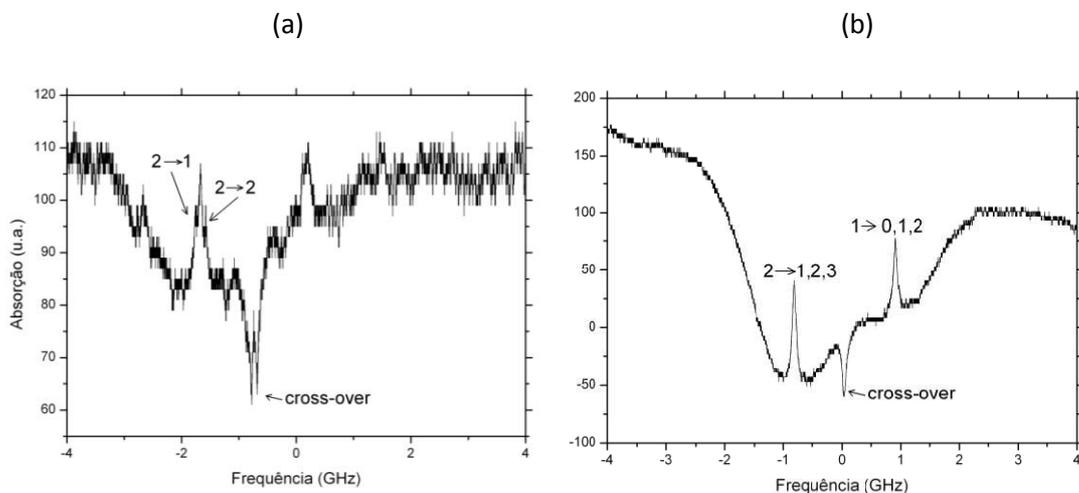


Figura 9: Espectro de absorção saturada para a linha (a)  $D_1$  e (b)  $D_2$  do sódio.

## 5. TRANSPARÊNCIA INDUZIDA ELETROMAGNETICAMENTE

Aguardando a chegada da segunda célula de sódio (sem o gás buffer), começamos a preparação para o experimento de EIT com a primeira célula, realizando uma montagem semelhante àquela da Figura 8, que está representada na Figura 10. Para este experimento, foi necessário o uso de um segundo laser de corante, que foi introduzido de maneira a atingir o primeiro beam splitter da montagem para o experimento de espectroscopia. Os feixes dos dois lasers ficam sobrepostos e co-propagantes dentro da célula de sódio. Foi necessário bloquear o feixe-contrapropagante residual do experimento de absorção saturada.

O laser de bombeio foi sintonizado na transição  $F = 2 \rightarrow F' = 1, 2$  e a EIT para o feixe de prova ocorreu quando este ficou ressonante com a transição  $F = 1 \rightarrow F' = 1, 2$ . A redução de absorção observada aqui é diferente daquela vista em absorção saturada. Os lasers estão sintonizados em transições hiperfinas diferentes e possuem polarizações ortogonais. Em absorção saturada, além de os feixes serem contra-propagantes, os dois feixes acessam a mesma transição e possuem a mesma polarização. Assim, com um dos lasers varrendo o espectro e mantendo fixa a frequência do feixe de bombeio, obtivemos janelas de transparência para as linhas  $D_1$  e  $D_2$  do sódio. Os espectros estão mostrados nas Figuras 11(a) e 11(b). Várias temperaturas foram utilizadas para obtenção de dados, mas as figuras selecionadas correspondem aos espectros com melhor aspecto de sinal/ruído. Na Figura 11(a) temos o espectro relacionado à linha  $D_1$ , para a célula à temperatura de  $138^\circ\text{C}$  na extremidade próxima à janela e  $110^\circ\text{C}$  no centro. A varredura era de 2 GHz, a potência do

feixe de bombeio era 70mW e a do feixe de prova 152 $\mu$ W. Podemos verificar uma redução de quase 50% na absorção do feixe.

A Figura 11(b) corresponde ao espectro de EIT para a linha D2 do sódio, com a célula à temperatura de 129 °C na extremidade e 103 °C no centro. A varredura era de 2GHz, o feixe de prova com 125 $\mu$ W de potência e o feixe de bombeio, sintonizado em 16976.31 cm<sup>-1</sup>, com potência de 72 mW. Nesse caso a redução na absorção foi menor, de apenas 38%.

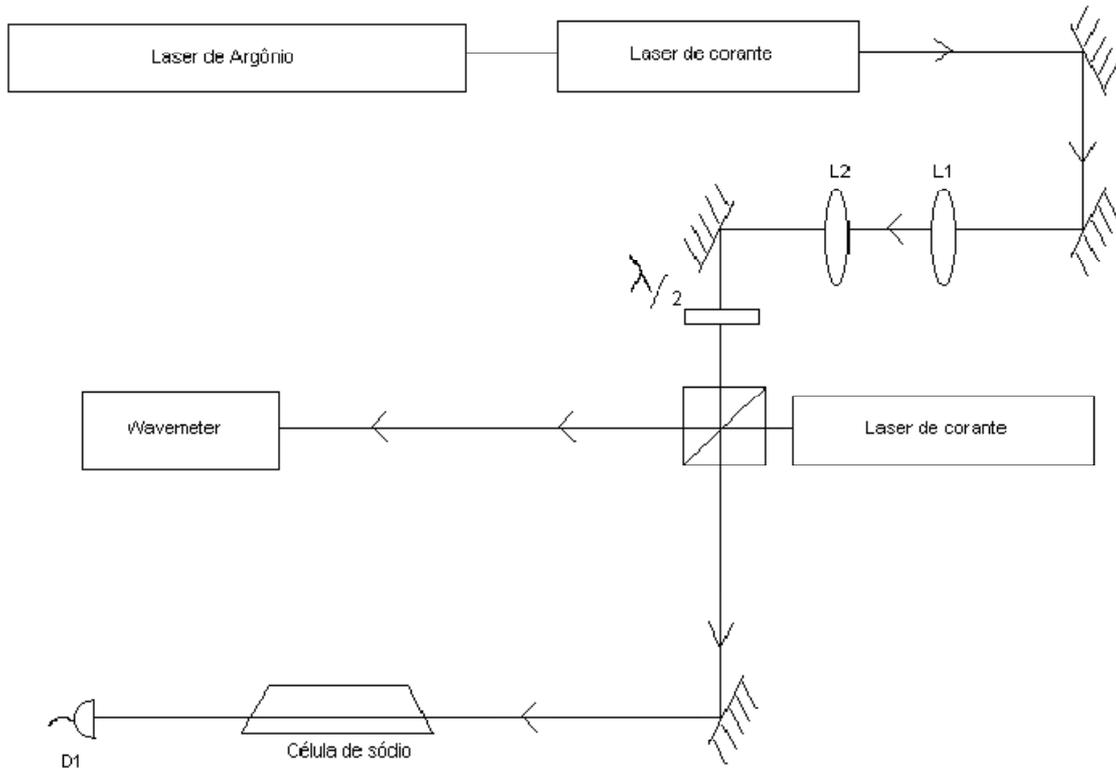


Figura 10: Arranjo experimental para observação de EIT.

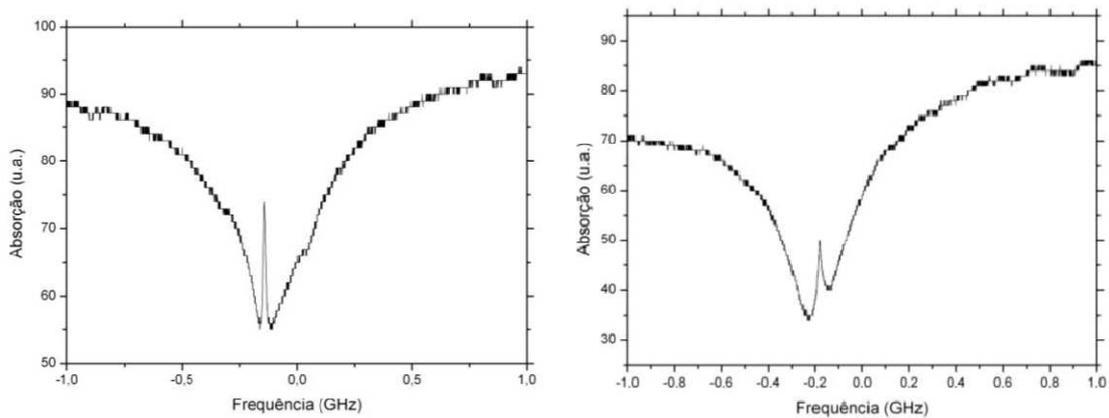


Figura 11: EIT para linhas (a) D<sub>1</sub> e (b) D<sub>2</sub> do sódio.

## 6. PRÓXIMOS PASSOS

A previsão para os próximos dois trimestres é de refazer os experimentos de absorção saturada e de EIT com a nova célula de sódio e de implementar pela primeira vez o experimento de Hanle-EIT, fazendo uso do solenóide já construído neste semestre. Com isso, espera-se conseguir resolver todas as transições possíveis da linha  $D_2$  do sódio no experimento de absorção saturada e, ainda, melhorar de maneira geral as resoluções dos espectros já obtidos. Já comecei a trabalhar com a segunda célula de sódio, fazendo um sistema de aquecimento similar ao da primeira célula, que já está pronto e funcionando.

## 7. CONCLUSÃO

Durante os primeiros seis meses de trabalho, foi possível completar uma grande parte do cronograma inicial proposto para o projeto de iniciação científica.

O objetivo principal era de aprender técnicas gerais de experimentos em um laboratório de física atômica. Isso foi feito de forma que, trabalhando várias horas no laboratório e participando de todas as etapas para a preparação dos experimentos, pude aprender a lidar com diversos equipamentos óticos, de fundamental importância para qualquer experimento que faça uso de lasers. Devido ao calendário de aulas durante o semestre, trabalhei efetivamente todas as sextas-feiras, chegando no laboratório por volta de 8 horas da manhã e saindo de lá cerca de 6 horas da tarde. Também participei das duas reuniões de grupo semanais do Grupo de Lasers e Aplicações, sendo que fui a palestrante em algumas delas. Entrei em contato com os experimentos realizados por outros integrantes do grupo e pude entender, melhor, qual é o objetivo almejado pelo grupo como um todo [7,8]. Durante todo esse período trabalhei com equipamentos como lock-in, chopper, além de todos os utensílios óticos, como beam splitters, lentes, espelhos, cavidades de Fabry-Perot, etc. Dessa forma, aprendi como fazer uso de maneira eficiente de tais equipamentos, simplificando a montagem de um experimento.

O experimento de espectroscopia foi realizado primeiro e, mais tarde, passei à realização do experimento de EIT, fugindo um pouco do cronograma inicial, que previa o experimento de EIT posterior ao experimento de Hanle-EIT. Em linhas gerais, no entanto, o projeto teve um ótimo andamento e os objetivos principais foram alcançados.

## 8. PARECER DO ORIENTADOR

A aluna concluiu com sucesso o seu projeto de Iniciação Científica, tendo realizado grande parte das atividades propostas. Durante o período do projeto, a aluna sempre trabalhou com bastante afinco e entusiasmo. Ela construiu o sistema para aquecimento da célula de vapor atômico de sódio, operou lasers de corante com os quais realizou espectroscopia de absorção saturada e observou o fenômeno de transparência induzida eletromagneticamente (EIT) em sódio. Assim, adquiriu alguma experiência com técnicas de Física Atômica. Paralelamente, se familiarizou com a bibliografia necessária para a compreensão das atividades. Por motivos ainda não claros, não foi possível observar o fenômeno de Hanle-EIT, proposto no projeto.

## 8. BIBLIOGRAFIA

[1] D. W. Preston, "Doppler-free saturated absorption: Laser spectroscopy" – *Am. J. Physics*. **64**, 1432 (1996).

[2] T. W. Hänsch, A. L. Schawlow e G. W. Series, “The Spectrum of Atomic Hydrogen” – *Scientific American* **240**, 94 (1979).

[3] S. E. Harris, “Electromagnetically Induced Transparency” - *Physics Today*, **50**, 36 (1997).

[4] Mais informações sobre o material  $\mu$ -metal podem ser encontradas no site da web [www.mimetals.com](http://www.mimetals.com).

[5] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker. Trad. A. S. Azevedo e J. P. S. de Azevedo, “Fundamentos de Física: Eletromagnetismo” – Rio de Janeiro, LTC Editora, 2003, vol**3**.

[6] “Sodium D line data”, D. A. Steck, disponível online em <http://steck.us/alkalidata> (revisão 2.0.1, 2 de maio de 2008)

[7] E. A. Cornell e C. E. Wieman, “The Bose-Einstein Condensate” - *Scientific American*, **278**, 26, (1998).

[8] S. L. Gilbert e C. E. Wieman, “Laser cooling and trapping for the masses” - *Optics and Photonics News*, **4**, 8 (1992).