

**Relatório de Iniciação Científica referente ao  
período de fevereiro de 2001 até setembro  
de 2001.**

**“Bobinas Magnéticas para Desaceleração e  
Aprisionamento de Átomos de Cálcio”**

**Número do processo: 00/08839-0**

**Bolsista: Davi Ribeiro Ortega**

**Orientador: Flávio Caldas da Cruz**

**Universidade Estadual de Campinas**

**Instituto de Física Gleb Wataghin**

## **Índice**

- I- Introdução**
- II- Projeto e construção das bobinas de aprisionamento**
- III- Experimento de desaceleração**
- IV- Experimento de Aprisionamento**
- V- Sistema de Vácuo**
- VI- Conclusão**
- VII- Disciplinas Coursadas**
- VIII- Plano de Trabalho para o Segundo Ano da Bolsa**
- IX- Referências**

## I - INTRODUÇÃO

O projeto enviado a FAPESP previa que discutissemos os primeiros resultados experimentais do resfriamento de Cálcio e o projeto e construção das bobinas usadas na armadilha magneto óptica. Previa também uma breve caracterização da armadilha e apresentação de alguns detalhes sobre o sistema de vácuo usado no experimento. No relatório passado, descrevemos o processo de construção da bobina usada no experimento de desaceleração de átomos neutros de Cálcio.

No item II deste relatório, descrevemos o projeto e a construção das bobinas de aprisionamento, dando detalhes elétricos e mecânicos da montagem. Neste item, ainda são apresentadas medidas de caracterização e análise dos dados.

Comentamos os frutos do contato que tivemos com o experimento de desaceleração no item III e ainda discutimos uma medida que possivelmente comprova o sucesso do experimento. O quarto item é sobre o experimento de aprisionamento, onde apresentamos uma explicação sobre o assunto e as medidas de curva de carga e descarga da armadilha. No item V, damos uma breve explicação de como é o sistema de vácuo utilizado nos experimento de desaceleração e aprisionamento.

O item VI conclui o trabalho desenvolvido e encerra o relatório referente aos segundo semestre. No sétimo item falamos sobre as disciplinas cursadas durante o período de bolsa de iniciação científica. No item VIII é sobre um plano de trabalho para o segundo ano de bolsa. O último item damos as referências utilizadas para a execução do projeto.

## II - PROJETO E CONSTRUÇÃO DAS BOBINAS DE PARA ARMADILHA MAGNETO ÒPTICA

Para projetarmos um solenóide, devemos levar em consideração fatores tais como tamanho, peso, perfil magnético que deve ser gerado, gradiente de campo magnético, temperatura limite do sistema, etc. O nosso experimento exigia campo magnético zero com um gradiente de campo de 60G/cm numa região do espaço.

A partir dessas exigências, optamos por duas bobinas em configuração de anti Helmholtz, que consiste de dois solenóides colineares, mas com correntes opostas (figura1). Esta configuração permite campo zero no ponto equidistante dos solenóides e alto gradiente de campo nesta região. Entretanto, o gradiente diminui conforme aumenta a distância entre as bobinas. Daí

a primeira limitação do sistema, que requer uma distância mínima de 60mm entre as bobinas, uma vez que o tubo de vidro que passa entre as bobinas tem esta medida.



Figura 1: Dois solenóides em configuração de anti Helmholtz. A corrente da bobina direita circula no sentido horário e a da esquerda anti horário

Na figura 2, temos um esquema da vista lateral do sistema. Pelo tamanho das janelas óticas, o raio interno deve ter no mínimo 20mm, já que as bobinas vão encaixadas nas janelas que estão na direção y. Por causa das outras janelas (na figura 2 estão apontadas como item 1 e 2) o raio externo deve ter no máximo 96mm.

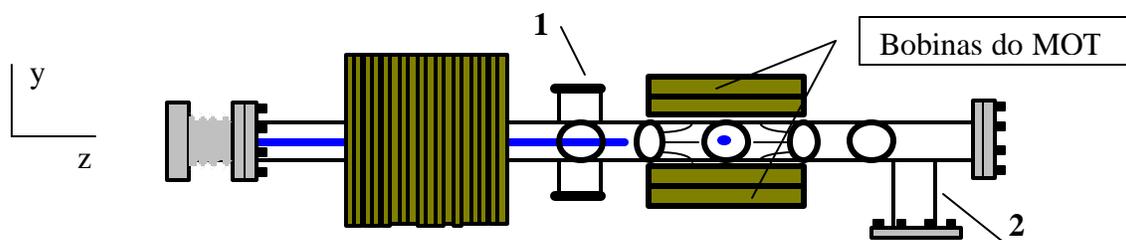


Figura 2: Esquema lateral do sistema de desaceleração e aprisionamento dos átomos de Cálcio.

Para termos uma idéia de como conseguir este gradiente de campo, usamos a bobina de desaceleração, antes de ser inserida no sistema, para simular situações de bobinas em configuração de anti Helmholtz.

A primeira medida foi feita deixando a seção 1 (vermelha, figura 3) com corrente de 1A no sentido anti-horário e a seção 1 (azul) com 1A no sentido horário. Na Segunda medida fizemos as seções 1 e 2 (vermelhas) com 1A no sentido anti-horário e as 1 e 2 (azuis) com a mesma corrente só que no sentido contrário. Ainda fizemos o mesmo ligando ainda as seções 3 e 4, sempre obedecendo o padrão de vermelhas com corrente no sentido anti-horário e azuis no sentido horário. Os resultados das medidas estão na figura 4.

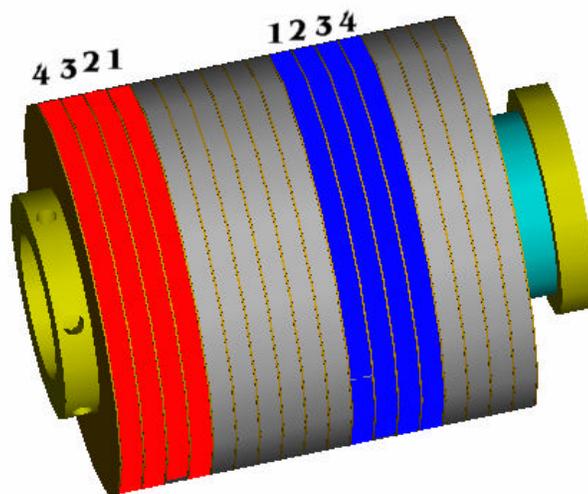


Figura 3: Esquema da bobina de desaceleração utilizada numa simulação de bobinas na configuração anti Helmholtz. Em vermelho, a corrente está no sentido anti-horário e, em azul, em sentido horário.

### Gráfico comparativo das medidas

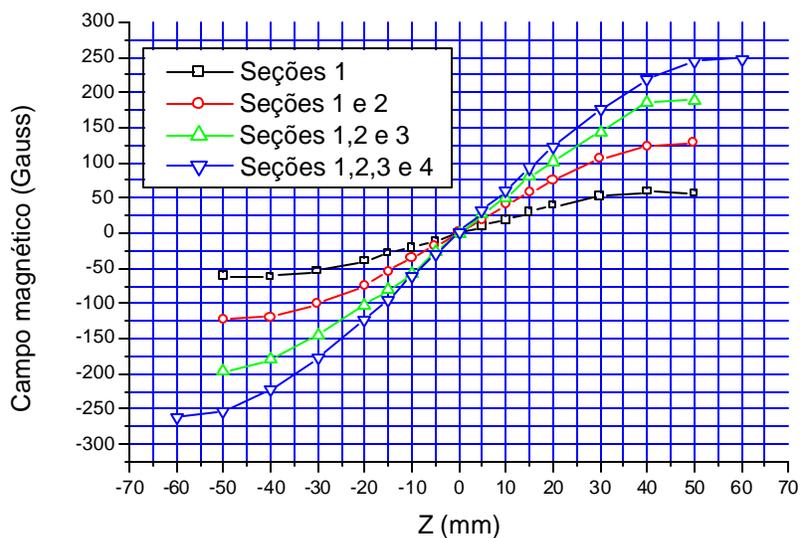


Figura 4: Gráfico das medidas feitas com a bobina a fim de se obter um ponto de partida para o projeto das bobinas de anti Helmholtz

Analisando cuidadosamente o gráfico, vemos que o gradiente desejado só é alcançado quando ligamos as quatro seções das “duas bobinas”. Com isto, pudemos obter um “chute” inicial

para usarmos o programa de simulação no Mathematica, apresentado no primeiro relatório, para podermos otimizar as dimensões dos solenóides a serem construídos.

Foram usados os seguintes parâmetros para a simulação:

$$\varphi = 0,8\text{mm}$$

$$R = 23\text{mm}$$

$$i = 1\text{A}$$

$$n = 24$$

$$c = 66$$

onde  $\varphi$  é o diâmetro do fio,  $R$  é o raio interno,  $i$  é a corrente,  $n$  é o número de voltas por camada e  $c$  é o número de camadas e dividimos cada um dos solenóides em duas seções separadas por uma parede de 3mm de espessura.

Conseguimos uma previsão para o perfil de campo na direção  $y$  das bobinas (figura 2) que é a curva em preto na figura 5. Em vermelho, temos uma curva ajustada aos pontos experimentais. Os pontos de máximos são de 369 Gauss na simulação e 337 Gauss nas medidas, o que nos dá um erro de exatidão por volta de 10%. A partir da simulação, previmos um gradiente de campo próximo ao centro da armadilha de 73,4 Gauss/cm com estas condições, satisfazendo o critério inicial.

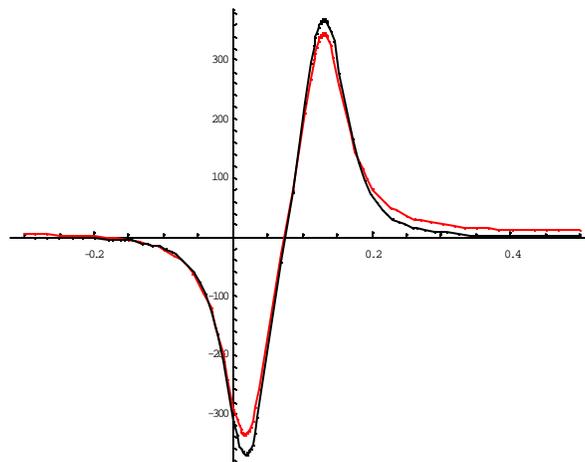


Figura 5: Comparação do perfil de campo simulado (preto) e medido (vermelho)

Passamos então a parte de construção dos solenóides. As seções foram enroladas em dois carretéis de latão. As medidas são: diâmetro externo de 186mm, cada parede lateral tem 3mm, e cada seção é enrolada em 19,5mm. Na figura 6, temos uma visão em perspectiva do projeto do carretel de latão.

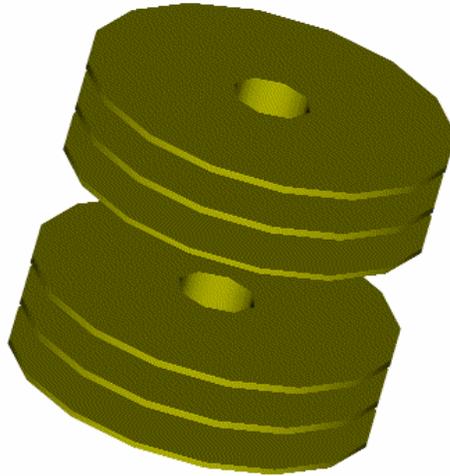


Figura 6: Esquema em 3D dos carretéis de latão usados para enrolar as bobinas de aprisionamento

O fio que foi usado é o de número AWG 21, tem 0,8mm de diâmetro e cerca de  $52\ \Omega/\text{km}$ . Foram usados 564m em cada seção totalizando 8,6kg de fio para todas as seções. Dada a quantidade de fio utilizado em cada bobina, fica fácil calcular a resistência ôhmica em  $23\ \Omega$ . Medindo as seções com multímetros digitais, encontramos o mesmo valor para a resistência na temperatura ambiente, que já havia sido calculada.

Usando medidor de LCR (SRC 715), verificamos a indutância de cada seção em 42mH. Como veremos mais adiante, é necessário 1A para obtermos o gradiente de campo necessário. Assim verificamos que todas as seções ligadas em série têm cerca de  $92\ \Omega$ , sendo que os dois carretéis dissipam 92W. Optamos por não utilizar refrigeração nas bobinas.

Para as medidas apresentadas a seguir, foi utilizada uma fonte da Tectrol estabilizada em tensão com limites em 600V e 1A, sendo o ruído da fonte da ordem de 5%.

A figura 7 nos mostra o perfil do campo no eixo z com os pontos medidos e a curva ajustada pelo Origin, com a opção de *multi-peaks* para lorentzianas que poderá ser utilizada para cálculos posteriores. A figura 8 nos mostra uma visão mais detalhada da parte central da figura 7. O gradiente de campo é na realidade o coeficiente angular da reta apresentada na figura 8. Com a ajuda do Origin determinamos este coeficiente em  $66,9 \pm 0,2$  Gauss/cm o que também nos dá um erro de exatidão de 10% do previsto (73,4 Gauss/cm).

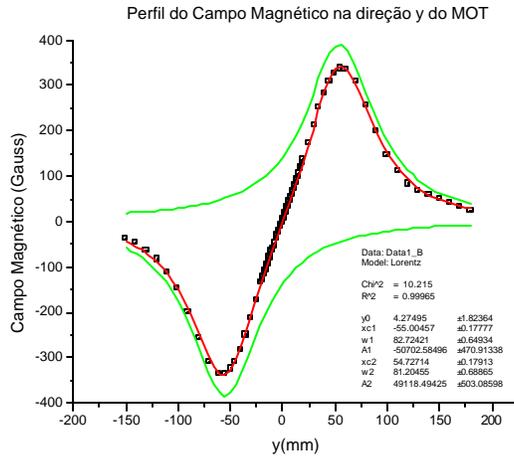


Figura 7: Perfil do Campo Magnético na direção y

Contudo, o eixo mais importante, eixo z, não conta ainda com uma simulação satisfatória. Porém, dada a sua importância, as medidas do perfil magnético gerado pelas bobinas nesta direção foram feitas cuidadosamente usando um intervalo de 1mm durante os primeiros 60mm, de 5mm até 120mm e de 10mm até 340mm onde o campo magnético torna-se aproximadamente zero. A figura 9 nos mostra o perfil de campo na direção de z e assumindo uma simetria cilíndrica não é necessário mostrar que o perfil é válido não só para a direção z, mas para qualquer direção radial ao centro no plano  $y=0$ .

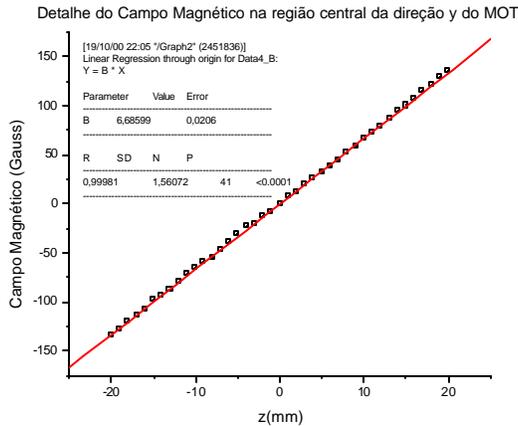


Figura 8: Detalhe do perfil do Campo no eixo y

Também obtivemos o gradiente de campo na direção z utilizando um gráfico mais detalhado da região central, figura 10, determinamos um o valor de  $33,6 \pm 0,2$  Gauss/cm.

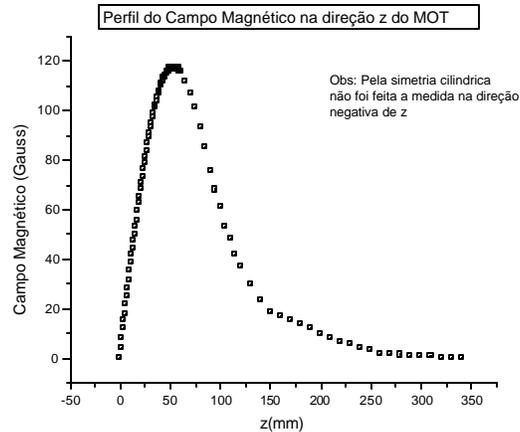


Figura 9: Perfil do Campo magnético no eixo z

Para se obter a corrente que passava pelas bobinas de modo confiável, resolvemos usar um resistor em série com as bobinas, que também foram ligadas em série entre si. Conhecido o valor da resistência ôhmica do componente, tivemos uma boa medida da corrente que passava pelo sistema medindo a tensão sobre ele.

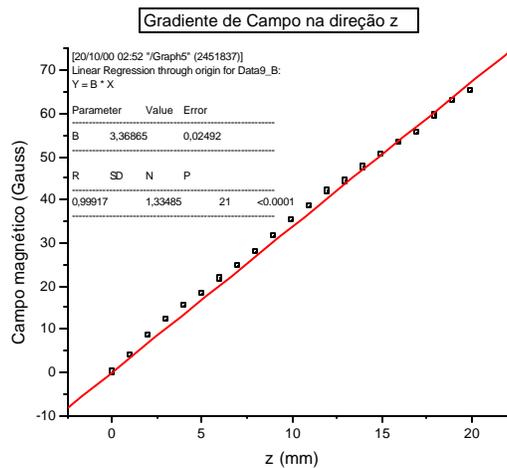


Figura 10: Gráfico detalhado do perfil do campo magnético no eixo y, próximo ao centro da armadilha

Assim, os testes foram feitos sob as seguintes condições:

Valor do Resistor de teste: 1,59 Ohms

Tensão sobre o resistor:  $1,582 \pm 0,001$  V

Tensão sobre as Bobinas:  $96,05 \pm 0,02$  V

Temperatura: 40°C

Como o sistema é não refrigerado, devemos nos preocupar com o aquecimento do sistema. Como se sabe, o efeito Joule causa imensa preocupação em quem trabalha com campos magnéticos gerados por solenóides. Uma vez que o campo depende diretamente da corrente e que a maioria dos materiais apresentam uma certa resistência, fica difícil conseguir altos campos sem uma alta temperatura.

Por dissipar apenas 92W, supomos erroneamente que os carretéis não necessitariam de refrigeração. Medindo a temperatura com um termopar e fazendo um teste de algumas horas, pudemos constatar que a temperatura do carretel chegava a 90°C depois de três horas e meia do início do teste, como mostra a figura 11. No entanto, duas ventoinhas foram suficientes para manter uma temperatura estável de 40°C durante várias horas.

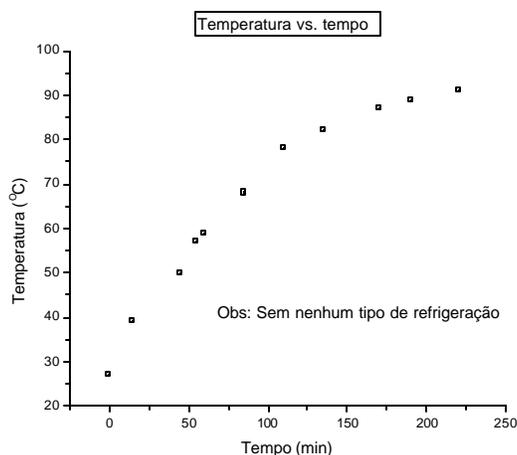


Figura 11: Temperatura do carretel com o sistema a 1A e sem refrigeração

### III - EXPERIMENTO DE DESACELERAÇÃO

Com a teoria apresentada no relatório anterior, com a bobina de desaceleração terminada e inserida no sistema, com os lasers em 423nm também prontos, o grupo foi capaz de desacelerar e aprisionar átomos neutros de Cálcio.

Vimos que ao passar 1A em cada seção da bobinas de desaceleração, que é refrigerada, o efeito Joule era suficiente para elevar a temperatura de modo a aumentar consideravelmente as resistências das seções, impedindo o ajuste de corrente até 2A.

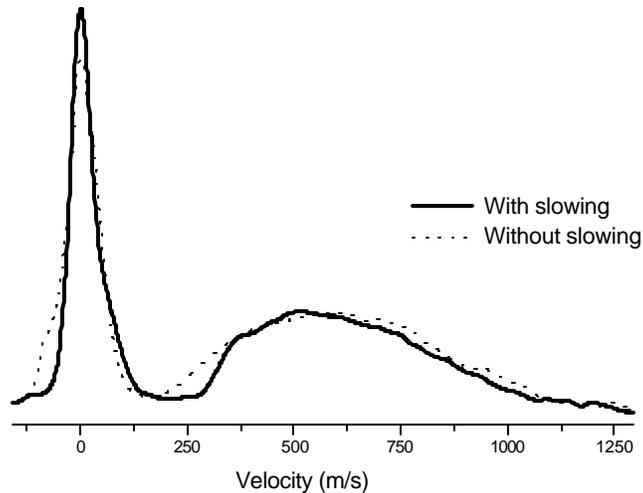


Figura 12: Curva de distribuição de velocidades medida no feixe atômico de Cálcio. A linha tracejada é a curva sem o feixe laser de desaceleração e a linha cheia é com o laser ligado

Podemos, mesmo assim, chegar a esta corrente se trocarmos a alimentação do transformador de 220V trifásico para 440V trifásico. Com isto, ao invés de desacelerarmos 13% dos átomos, iríamos desacelerar 55%. Entretanto esta alternativa ainda não foi implantada no laboratório.

Uma evidência de que ocorreu desaceleração está na figura 12 que mostra uma medida preliminar da curva de distribuição de velocidades dos átomos do feixe atômico sem o feixe laser de desaceleração (linha tracejada) e com o feixe (linha contínua)[1]. A pequena depressão logo após o primeiro pico indica que os átomos que deveriam ocupar aquela parte da curva foram desacelerados.

Entretanto a evidência mais clara que ocorre desaceleração é que não conseguimos carregar a armadilha magneto optica com átomos rápidos. Observamos então que se desligarmos o feixe laser de desaceleração não obtemos átomos na armadilha. Outra evidência é a existência de uma frente de onda na fluorescência do feixe atômico, que é onde os átomos desacelerados se acumulam.

A medida de distribuição de velocidade é feita colocando um feixe laser (laser de prova) que atravessa obliquamente o feixe atômico a quarenta e cinco graus, figura 13. Um detector de fluorescência é colocado de maneira apropriada a enxergar quando os átomos decaem ao nível fundamental, depois de terem sido excitados para o nível  $^1P_1$ .

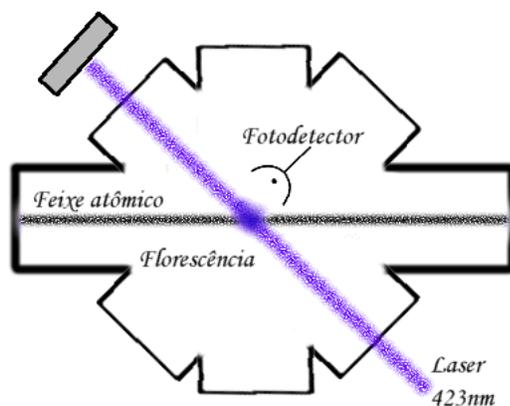


Figura 13: Esquema da montagem para a medida da distribuição de velocidades do feixe atômico

Conforme podemos esperar pelo efeito Doppler, a cada velocidade diferente o átomo terá uma frequência de ressonância diferente. Portanto, variando a frequência do laser, fazemos com que átomos de diferentes velocidades possam entrar em ressonância com o laser e serem detectados.

#### IV - EXPERIMENTO DE APRISIONAMENTO

O experimento de aprisionamento de átomos neutros envolve seis feixes lasers com polarização circular, mutuamente ortogonais, e duas bobinas em configuração de anti-Helmholtz, que garantem campo zero na região de intersecção dos laser e um alto gradiente de campo ao redor. [2]

Entretanto, é necessário uma boa potência de laser em 423nm para podermos operar a armadilha. Para isto o grupo conta com um laser de Ti:Safira feito no laboratório, bombeado por um laser de estado sólido (Nd:YVO<sub>4</sub>). O Ti:Safira é então duplicado numa cavidade em anel com um cristal e estabilizada [3]. O esquema de lasers pode ser visto na figura 14.

## FREQUENCY DOUBLED STABILIZED TI:SAPPHIRE LASER

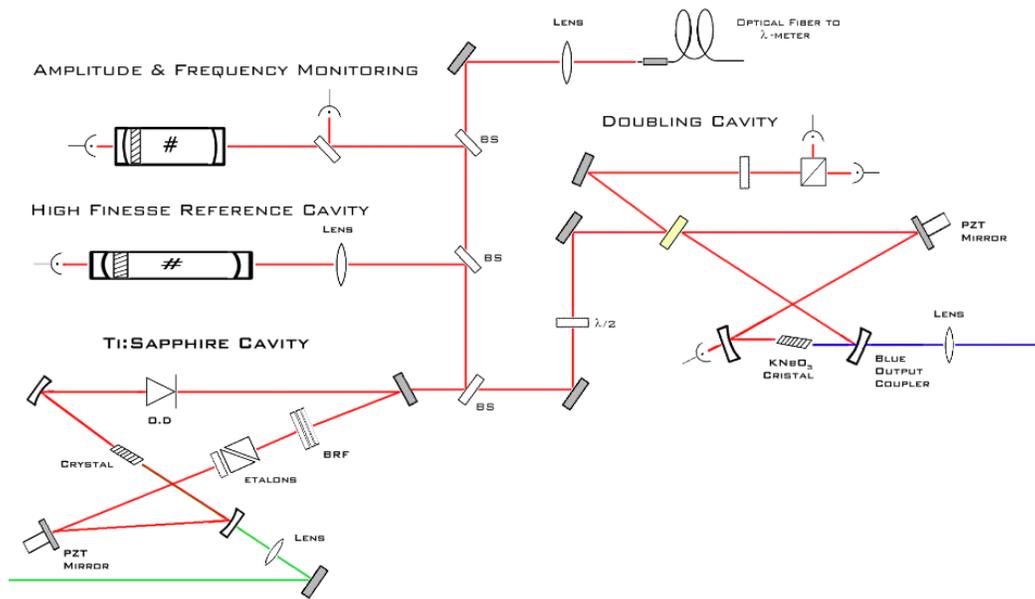


Figura 14: Esquema do laser usado para produzir uma potência de até 200mW em 423nm

Um átomo nas proximidades da armadilha “sente” o campo magnético das bobinas de aprisionamento. Por efeito Zeeman o estado  $^1P_1$ , que antes era degenerado, tem uma separação dada a seu número quântico de momento angular  $?_j = 1$ .

Supomos então dois lasers colineares contrapropagantes entre si, com polarização circular e dessintonizados para o vermelho. O laser que vem da direita tem polarização circular para a direita e o laser que vem da esquerda tem polarização circular para a esquerda. No local onde  $z = 0$  o campo magnético é nulo e cresce linearmente com  $z$ . Como o laser está dessintonizado quase não existe probabilidade do átomo absorver fótons de nenhum dos dois feixes laser, mas quando  $z$  é maior que zero, o campo magnético, por efeito Zeeman, quebra a degenerescência do estado  $^1P_1$  e ocorre a ressonância com o feixe com polarização circular para a esquerda. Ou seja o átomo ao absorver o fóton proveniente da esquerda é arremessado para a direita. O mesmo ocorre se o átomo for em direção a  $z$  menor que zero. Porém ele absorverá fótons do feixe da direita que o arremessarão para a esquerda. Um modelo em três dimensões análogo ao descrito acima com feixes ortogonais entre si é como funciona a armadilha magneto óptica.

Para carregar a armadilha, precisamos de átomos com baixas velocidades, logo também necessitamos que o feixe de átomos seja desacelerado. Neste caso, para ter uma idéia de como estava a configuração do perfil de campo, fizemos uma superposição do campo magnético da bobina de desaceleração e das bobinas do MOT (Magneto Optical Trap), figura 15.

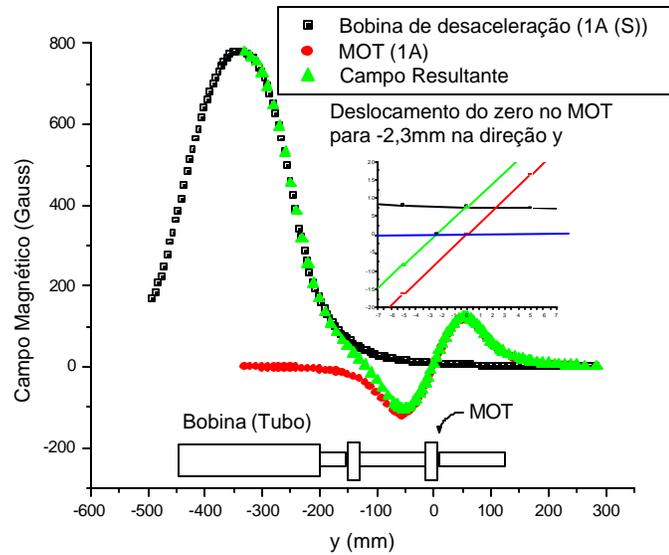


Figura 15: Superposição (curva em verde) dos campos magnéticos gerados pela bobina de desaceleração (preto) e pelas bobinas de aprisionamento (vermelho). No detalhe podemos ver o deslocamento do ponto zero do campo magnético devido a bobinas de desaceleração. A linha azul indica campo magnético zero.

A figura 16 mostra a curva de carga e descarga da armadilha. Esta medida é feita simplesmente observando a fluorescência da armadilha após o desligamento dos lasers de aprisionamento (descarga), e acionamento deles (carga). Com esta figura, podemos estimar o número de átomos da armadilha em  $4 \cdot 10^6$  átomos. Podemos observar que os átomos ficam em média 7,7ms na armadilha.

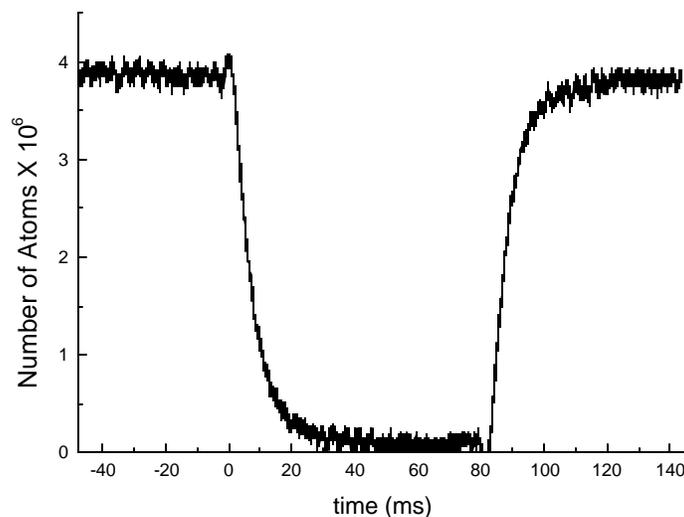


Figure 16: Curva de carga e descarga da armadilha

## V - SISTEMA DE VÁCUO

Com duas bombas turbo moleculares atingimos um vácuo de até  $8 \cdot 10^{-8}$  mBar, após procedimentos usuais de “baking”.

Como vácuos dessa magnitude não são possíveis de serem atingidos em um curto espaço de tempo depois de aberto o sistema, usamos então uma técnica que minimiza este tempo. Antes de abrimos o sistema, desligamos as bombas de vácuo e abrimos o Nitrogênio, que reveste as paredes do sistema impedindo que partículas de água, óleo e outras substâncias se alojem nelas. São estes tipo de substâncias que dificultam o vácuo, pois passam muito tempo soltando vapores no sistema. Com esta técnica, mesmo após horas com o sistema aberto, em algumas horas o vácuo é recuperado.

## VI - CONCLUSÃO

Após a conclusão das bobinas de aprisionamento, pudemos ter contato com diferentes aspectos do experimento. Isto foi muito importante para o aprendizado geral de física e de laboratório.

Como vimos, as bobinas funcionam bem, cumprindo o objetivo principal do trabalho. Mas ainda restam alguns desafios tais como desligar as bobinas de MOT rapidamente (micro segundos), a fim de conseguir a curva de distribuição de velocidades e podermos estimar a temperatura dos átomos dentro da armadilha.

Finalmente, o convívio com os outros alunos ensinou como trabalhar em equipe dentro do laboratório. De fato, uma bela experiência como iniciação científica.

## VII – DICIPLINAS CURSADAS

O segundo semestre de iniciação científica coincidiu praticamente com o quinto semestre do curso de graduação em física. Neste período cursamos matérias importantes como Eletromagnetismo I, Métodos Matemáticos I e Estrutura da Matéria.

Todos os três cursos acima ajudaram no andamento dos trabalhos produzidos dentro do laboratório. Eletromagnetismo foi importante do ponto de vista de cálculos de campos magnéticos, e um primeiro contato com as equações de Maxwell. Em Métodos Matemáticos I tivemos contatos com algumas funções especiais, técnicas de resolução de equações diferenciais e etc.

Estrutura da Matéria foi a disciplina que mais colaborou para o entendimento do experimento de resfriamento e aprisionamento de átomos. Por ser um curso mais conceitual, nos ensinou tópicos como estados quânticos de um átomo, interação entre luz e matéria, princípio de Heisenberg e outros.

Também fizemos Eletrônica I que nos deu uma boa base para projetar circuitos. Nesta disciplina aprendemos sobre filtros, curvas de caracterização de diodos e transistores, aprendemos sobre fontes de corrente e tensão e sobre amplificadores de potência. Tivemos ainda um primeiro contato com técnicas digitais.

No sexto semestre, o atual, estamos cursando disciplinas como Métodos Matemáticos II onde tomamos contato com Transformada de Fourier, variáveis complexas e cálculo variacional. Em Eletromagnetismo II estamos estudando ondas eletromagnéticas, de forma a colaborar com o aprendizado na área de laser.

Estamos cursando também Mecânica Quântica I, que ajuda a entender melhor os efeitos que ocorrem durante a desaceleração e o aprisionamento de átomos. Por fim fazemos uma disciplina eletiva que trata de fenomenologia de física de partículas.

## VIII – PLANO DE TRABALHO PARA O SEGUNDO ANO DA BOLSA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

### **Desligamento da bobina de Aprisionamento**

Para medir a temperatura de átomos de Cálcio aprisionados através do espectro da estreita transição de intercombinação  $^1S_0 - ^3P_1$ , em 657nm, é necessário retirarmos o campo magnético das bobinas de desaceleração. Porém com a armadilha desligada os átomos tendem a se dispersarem do local da armadilha impossibilitando a medida. Por isto devemos desligar a bobina completamente em pouco tempo (centenas de micro segundos).

Mas como as bobinas têm uma indutância alta, por volta de 166mH pois estão ligadas em série, e uma resistência de 92 $\Omega$ , temos que o tempo de desligamento da bobina é de 4ms. Este tempo está acima do qual podemos trabalhar.

Por isto desenvolveremos um circuito para o chaveamento do solenóide com tempos de desligamento abaixo de 300 micro segundos. A escolha dos componentes, a montagem de todo o sistema e as medidas de tempo de desligamento estará por conta do aluno.

## **Medidas na armadilha de átomos de Cálcio**

O aluno acompanhará as medidas de temperatura e densidade dos átomos na armadilha, bem como outras atividades do grupo em relação ao experimento com átomos de Cálcio, além de estudar alguns tópicos sobre a teoria do experimento.

## **Montagem e estabilização de um laser de diodo em 657nm para investigação da armadilha de Cálcio.**

O aluno desenvolverá um laser de diodo em cavidade de Littman e vai ainda projetar e montar um circuito que possibilite a modulação em alta frequência (RF) da corrente do laser. Deverá montar um sistema de controle de temperatura para o laser de diodo. A estabilização será feita usando um ressonador óptico de média finesse (1000).

Deverá ainda aprender sobre estabilização de lasers [4] especialmente pela técnica de Pound Drever Hall [5], cavidades de Fabry-Perot e óptica geométrica.

## **Cronograma**

**Primeiro trimestre** : Projeto, construção e teste do circuito de chaveamento da bobina.

**Segundo trimestre** : Acompanhamento das medidas de temperatura dos átomos na armadilha, e estudos sobre tópicos correspondentes.

**Terceiro trimestre** : Montagem do laser de 657nm na cavidade Littman, caracterizações básicas do laser, montagem do sistema de controle de temperatura. Estudos de óptica geométrica e Fabry-Perot e técnicas de estabilização.

**Quarto trimestre** : Montagem do sistema óptico e eletrônico de estabilização pela técnica de Pound Drever e Hall. Medidas análise e eliminação de ruídos, largura de linha do laser e uma melhor caracterização do sistema.

## **IX – REFERÊNCIAS**

- 1- N. Beverini, F. Strumia, Applied Laser Spectroscopy, 1990, 469.
- 2- W.D. Phillips, H.J. Metcalf, SCI AM 256: (3) 50-56 MAR 1987.
- 3- H.J.Onisto, R.L.Cavasso-Filho, A.Scalabrin, D.Pereira, e F.C.Cruz, “A Frequency doubled, stabilized, all-solid-state Ti:sapphire laser”,Opt. Engineering, submetido, 2001.
- 4- M.W. Hamilton, Contemporary Physics, 1989, 30, 1, 21-33
- 5- R.W.P. Drever, J.L. Hall, F.V. Kowalski, Appl.Phys. B, 31, 97-105 (1983).