

## 1. Identificação da Proposta

**Título:** Magnetometria atômica baseada na espectroscopia de sistemas atômicos coerentemente preparados.

**Instituição Executora do Projeto:** UACSA/UFRPE – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Cabo de Santo Agostinho, PE.

**Orientador:** Prof. Sergio Vladimir Barreiro Degiorgi (CPF: 013.382.614-79).

**Coorientador:** Rafael Alves de Oliveira (CPF: 060.534.824-39).

## 2. Resumo da Proposta

A proposta apresentada no presente edital tem por objetivo fazer pesquisas teóricas e experimentais na espectroscopia de sistemas atômicos coerentemente preparados. Além disso, pretendemos desenvolver um protótipo de magnetômetro atômico, baseado em ressonâncias subnaturais originadas pela interação coerente de campos ópticos com uma amostra de átomos alcalinos. Esse assunto possui vasto interesse na engenharia, pois ele tem grande aplicabilidade tecnológica na metrologia. Com essa técnica é possível realizar medições muito precisas do campo magnético, as quais são importantes para as diversas áreas e temas do conhecimento, tais como: na medicina, no armazenamento de informação, na detecção de minerais e na prospecção de petróleo, entre outras. Além das aplicações tecnológicas, o tema é muito interessante para as ciências básicas, por envolver conceitos fundamentais de física associados aos processos de interação da radiação com a matéria. A compreensão desses conceitos permite conhecer os limites fundamentais na sensibilidade desses magnetômetros, que estão associados com diferentes mecanismos de relaxação da coerência atômica, influência de diferentes tipos de ruído do sistema e com efeitos não lineares. Através deste projeto, solicitamos uma bolsa de mestrado da FACEPE para ajudar no fortalecimento das atividades de pesquisa do Programa de Pós-graduação em Engenharia Física (PPENGFIS), que tem sua sede na Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Campus das Engenharias (UACSA-UFRPE). O projeto é bastante inovador, pois integra conceitos fundamentais de ciência básica com o desenvolvimento de aplicações tecnológicas. A consolidação de uma linha de pesquisa experimental em magnetometria atômica permitirá criar, em um futuro breve, um laboratório de magnetometria na UACSA-UFRPE. Desta forma, a UACSA se tornará uma referência de desenvolvimento tecnológico na região e será um motor de inovação e desenvolvimento para o polo industrial de Suape.

## 3. Introdução

Nos últimos anos, a comunidade científica tem despertado grande interesse por fenômenos de espectroscopia coerente, onde a interação entre um meio material e a luz é governado pela coerência induzida entre os diferentes estados quânticos do material. Na maioria desses fenômenos, o meio material (geralmente um vapor atômico) é preparado através da interação com um feixe óptico de bombeio que induz coerência atômica nele e, posteriormente, é analisado por um outro feixe, chamado de sonda [1]. Entre os efeitos mais notáveis observados, encontra-se a transparência eletromagneticamente induzida (EIT: Electromagnetically Induced Transparency) [2], onde ocorre um cancelamento da absorção de luz pela amostra atômica, mesmo que os campos ópticos sejam ressonantes com a transição atômica. Esse efeito foi observado pela primeira vez por Boller et al, em vapor de estrôncio [3]. O fenômeno de EIT está intimamente ligado ao de aprisionamento coerente de população (CPT: Coherent Population Trapping), onde o sistema fica confinado numa superposição quântica de estados que está desacoplada da radiação, esse fenômeno foi observado primeiramente por Alzetta et al [4]. A maioria de experiências deste tipo foram realizadas em átomos alcalinos utilizando uma configuração de três níveis, na condição  $\Lambda$ , onde os dois níveis mais baixos são estados hiperfinos do nível fundamental e o estado excitado é um nível P. Do ponto de vista espectroscópico, o fenômeno de EIT corresponde à observação de ressonâncias muito estreitas cuja largura é muitas vezes menor do que a largura natural da transição. Essa largura subnatural é determinada pelo tempo de relaxamento da coerência entre os níveis fundamentais, o qual pode ser muito longo, conforme foi observado por Brandt et al. [5] e Budker et al. [6]. Foram propostas e realizadas várias aplicações destas ressonâncias coerentes: resfriamento abaixo do limite de recuo, Harris et al. [7], geração de não linearidades gigantes, Shang et al. [8], e separação isotópica, Kasapi [9]. Contudo, em certas condições, pode ocorrer que a interação coerente aumente a absorção do meio na ressonância. Esse fenômeno é denominado Absorção Eletromagneticamente Induzida (EIA: Eletromagnetically Induced Absorption) e foi previsto e observado pela primeira vez por Lezama et al. em 1998 [10], esse trabalho é parte do trabalho de Tese de Mestrado em Física do Orientador deste projeto. Outro efeito coerente é o chamado Hanle-EIA que pode ser observado com um único Laser na presença de um campo magnético

[11,12]. O aumento da absorção do meio ocorre devido à transferência espontânea de coerência dos estados excitados para os fundamentais [13]. As ressonâncias subnaturais são também de interesse espectroscópico e metrológico. Em particular, a sua posição em frequência depende, por meio do efeito Zeeman, do campo magnético presente. Essas posições podem então ser usadas para uma medição precisa de campos magnéticos, Lee et al. [14]. A área que estuda a medida de campos magnéticos é chamada de magnetometria e tem sido desenvolvida desde tempos muito antigos, começando com a invenção da bússola na China antiga para fins de navegação. Nas últimas décadas, os dispositivos supercondutores de interferência quântica (SQUID: Superconducting Quantum Interference Device) tem sido os magnetômetros mais sensíveis, com sensibilidade de aproximadamente  $1fT/\sqrt{Hz}$ . A medição do campo magnético encontra aplicação em uma ampla variedade de áreas, incluindo a medicina, armazenamento de informação, detecção de minerais, métodos de prospecção de petróleo, detecção de contrabando, exploração do espaço, etc. Desenvolvimentos recentes na tecnologia de magnetômetros atômicos permitiu ultrapassar os SQUIDs como os dispositivos mais sensíveis para medir campos magnéticos. Em 1957 Dehmelt propôs, inicialmente, a observação da precessão de spins em átomos alcalinos para determinar a magnitude de um campo magnético [15] e em 1961 Bell e Bloom forneceram a primeira demonstração experimental [16]. Ao longo das seguintes décadas, muito esforço foi gasto na melhoria da exatidão e precisão de magnetômetros atômicos, que tem a vantagem sobre os SQUIDs de não requerer criogenia para operar. Nos últimos anos, os magnetômetros de Radio Frequência (RF) e os magnetômetros livres de relaxamento por troca de spin (SERF), foram introduzidos com sensibilidade demonstrada abaixo de  $1fT/\sqrt{Hz}$  e capacidade para, eventualmente, detectar campos com níveis de attotesla. Uma análise abrangente do estado atual da tecnologia de magnetômetros atômicos é apresentado por Budker e Romalis [17]. O princípio básico da magnetometria atômica é polarizar uma amostra de átomos alcalinos por bombeamento óptico [18] e monitorar a sua precessão num campo magnético, usando um feixe de prova. A frequência de precessão, chamada frequência de Larmor dos spins atômicos no campo magnético, é proporcional ao campo magnético e a constante de proporcionalidade é o fator giromagnético, o qual serve como fator de conversão entre a frequência de Larmor e a intensidade do campo magnético. Existem inúmeros métodos para monitorar a polarização dos spins, um deles é usar um feixe sonda polarizado linearmente que propaga ao longo de uma direção ortogonal ao feixe de bombeamento. A medida que o feixe de sonda viaja através do vapor alcalino, seu plano de polarização gira por um ângulo proporcional à componente de spin ao longo dessa direção e é detectada essa rotação, a fim de observar o comportamento dos spins. Em um nível fundamental, o magnetômetro mede a separação de energia entre os subníveis Zeeman do estado fundamental do átomo devido ao campo magnético. A largura de linha de uma tal medida espectroscópica é dada pelo inverso do tempo de vida da coerência dos spins atômicos, então, a construção de um magnetômetro sensível depende de atingir o máximo tempo de vida possível da polarização atômica. Nossa investigação, neste projeto, será direcionada ao estudo de alguns aspectos da magnetometria atômica, baseada na interação coerente de uma amostra de átomos alcalinos com dois campos ópticos. Nessa linha, o grupo de pesquisa, do qual o orientador deste projeto integrava até o ano 2013, fez duas propostas experimentais de magnetômetros atômicos [19,20], porém o magnetômetro que será proposto neste projeto pretende ser mais sensível que os já construídos, sendo fundamental para o desenvolvimento tecnológico da região.

## 4. Objetivos

### 4.1 Geral

- Aprofundar o conhecimento na área de magnetometria atômica, tanto do ponto de vista teórico como experimental e estudar a espectroscopia de sistemas atômicos interagindo com dois campos ópticos, mutuamente correlacionados.

### 4.2 Específicos

- Montar um experimento que permita estudar a transmissão de um feixe sonda, na presença de um feixe de bombeio, através de uma célula contendo vapor de átomos alcalinos.
- Medir o espectro do feixe sonda na presença do feixe de bombeio.
- Montar um experimento para medir o campo magnético usando ressonâncias coerentes.
- Construir e testar um protótipo de magnetômetro atômico baseado no uso de ressonâncias coerentes.
- Estudar problemas, de caráter fundamental, que limitam a sensibilidade de um magnetômetro, especificamente, os mecanismos de relaxação da coerência atômica, os mecanismo de relaxamento por troca de spin, influência do ruído do laser, conversão de ruído de fase em ruído de amplitude, ruído quântico e efeitos não lineares, como efeito Zeeman quadrático.

## 5. Metodologia

Para atingir os objetivos do projeto, iremos montar um aparato experimental composto por uma célula, contendo vapor de átomos alcalinos, na qual iremos incidir dois feixes de luz provenientes de um laser de diodo. Para a geração dos dois campos mutuamente correlacionados (bombeio e sonda) usaremos um laser de diodo com cavidade externa, estabilizado em frequência através de uma montagem de absorção saturada. O feixe de saída do Laser passará através de dois moduladores acusto-ópticos consecutivos. Desta forma, são obtidos dois feixes de luz altamente correlacionados com uma diferença de frequência sintonizável. Esses feixes, adequadamente polarizados e sobrepostos, serão enviados para a amostra atômica. Após da interação dos feixes com a amostra atômica, mediremos a transmissão, através da célula, do feixe de prova usando um fotodetector. Serão usadas técnicas pertinentes para o processamento do sinal e os resultados serão discutidos à luz das previsões teóricas, baseadas num modelo que será desenvolvido no projeto. Uma vez criada uma anisotropia no meio atômico, usando um bombeio óptico, existem várias opções para a observação da precessão atômica. Neste projeto será usado um método ressonante de detecção da evolução atômica em regime estacionário, onde o sistema atômico é excitado com um sinal da mesma frequência que a precessão de Larmor, via uma modulação na luz.

## 6. Aderência aos critérios de Priorização

Este projeto será desenvolvido na Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Campus das Engenharias da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UACSA-UFRPE), no programa de Pós-Graduação em Engenharia Física (PPENGFIS). Esse programa de Pós-Graduação propõe-se criar relações científicas-Tecnológicas com o polo industrial de Suape e com os laboratórios do Porto Digital. Os temas estratégicos para o desenvolvimento do estado relacionados com o desenvolvimento de Arranjos Produtivos Locais (APLs) são dois:

- 1) Metalmecânico de Suape
- 2) Porto Digital

O desenvolvimento deste projeto é de fundamental importância para a consolidação das atividades de pesquisa na UACSA-UFRPE, dando formação sólida na área tecnológica aos estudantes que passem pelo PPENGFIS. Isso implicará num aumento da qualificação dos recursos humanos na região, beneficiando as empresas do parque tecnológico pernambucano que têm processos tecnológicos de alta complexidade, particularmente na região de Suape, onde nossa instituição está inserida. Assim, estaremos contribuindo para a formação de recursos humanos de altíssima qualidade na área tecnológica para o estado, possibilitando a chegada de empreendimentos industriais de grande porte e de maior valor agregado, tendo um ganho social e econômico significativo para o estado. Atendemos aos critérios de priorização, de acordo com o edital:

- I. Reserva de bolsas para cursos novos
- II. Apoio diferenciado à pós-graduação em Engenharias

## 7. Resultados Esperados

Conforme explicitado nos objetivos e na metodologia, do ponto de vista básico, esperamos que este projeto contribua para aprofundar o conhecimento na área da magnetometria atômica, tanto desde o ponto de vista teórico como experimental. Para isso, estudaremos a espectroscopia de sistemas atômicos que interagem com dois campos ópticos mutuamente correlacionados. Estudaremos as ressonâncias espectrais características da resposta coerente deste sistema. Analisaremos a possibilidade de usar estas ressonâncias coerentes para a medição precisa do campo magnético. Esta possibilidade é dada, em princípio, pela dependência espectral da posição de certas ressonâncias com o campo magnético através do efeito Zeeman. Será construído um dispositivo para medir o campo magnético e serão estudadas suas vantagens e desvantagens com relação a outros métodos de medida. Será construído e caracterizado um protótipo de magnetômetro atômico, baseado no uso de ressonâncias subnaturais originadas pela interação coerente de uma amostra de átomos alcalinos com dois campos ópticos. Em paralelo com este objetivo prático, requer-se a abordagem de vários problemas de caráter fundamental que limitam a sensibilidade de um magnetômetro, tais com, o mecanismos de relaxação da coerência atômica, mecanismo de relaxamento por troca de spin, influência do ruído do laser, conversão de ruído de fase em ruído de amplitude, ruído quântico e efeitos não lineares como efeito Zeeman quadrático.

## 8. Cronograma de Atividades

| Atividades                                                                                                                                               | 1º Semestre | 2º Semestre | 3º Semestre | 4º Semestre |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Revisão e atualização bibliográfica.                                                                                                                     | X           | X           | X           | X           |
| Disciplinas.                                                                                                                                             | X           | X           |             |             |
| Montar experimento que permita estudar a transmissão de um feixe sonda na presença de um feixe de bombeio numa célula contendo vapor de átomos alcalinos |             | X           |             |             |
| Montar experimento para medir o campo magnético usando ressonâncias coerentes                                                                            |             | X           |             |             |
| Construção e teste de um protótipo de magnetômetro atômico baseado no uso de ressonâncias coerentes                                                      |             |             | X           |             |
| Estudar problemas de caráter fundamental que limitam a sensibilidade de um magnetômetro                                                                  |             | X           | X           |             |
| Análise dos resultados.                                                                                                                                  |             |             | X           | X           |
| Elaboração de artigo.                                                                                                                                    |             |             |             | X           |
| Elaboração de Relatório.                                                                                                                                 | X           | X           | X           | X           |
| Defesa da Dissertação.                                                                                                                                   |             |             |             | X           |

## 9. Referências Bibliográficas

- [1] E. Arimondo, Progress in Optics 35, 257 (1996).
- [2] M. Fleischhauer, A. Imamoglu, and J. P. Marangos, Rev. Mod. Phys. 77, 633 (2005).
- [3] K.-J. Boller, A. Imamoglu, and S. E. Harris, Phys. Rev. Lett. 66, 2593 (1991).
- [4] G. Alzetta, A. Gozzini, L. Moi, and G. Orriols, Nuovo Cimento B 36, 5 (1976).
- [5] S. Brandt, A. Nagel, R. Wynands, and D. Meschede, Phys. Rev A 56, R1063 (1997).
- [6] D. Budker, D.F. Kimball, S.M. Rochester, and V.V. Yashchuk, Phys. Rev. Lett. 83, 1767 (1999).
- [7] S.E. Harris, J.E. Field, and A. Imamoglu, Phys. Rev. Lett. 64, 1107 (1990).
- [8] S.Q. Shang, B. Sheehy, H. Metcalf, P. Van der Straten, and G. Nienhuis, Phys. Rev. Lett. 67, 1094 (1991)
- [9] A. Kasapi, Phys. Rev. Lett. 77, 1035 (1996)
- [10] A.M.Akulshin, S.Barreiro, e A.Lezama. Phys. Rev. A 57, 2996 (1998).
- [11] F. Renzoni, S. Cartavela, G. Alzetta, e E. Arimondo. Phys. Rev. A 63, 065401 (2001).
- [12] C. Andreeva, S. Cartaleva, Y. Dancheva, V. Biancalana, A. Burchianti, C. Marielli, E. Mariotti, L.Moi, e K. Nasyrov. Phys. Rev. A 66, 012502 (2002).
- [13] A.V. Taichenachev, A.M.Tumaikin, e V.I.Yudin. Phys. Rev. A, 60:011802, 2000.
- [14] Hwang Lee, Michael Fleischhauer, and Marlan O. Scully, Phys. Rev. A 58, 2587(1998)
- [15] H. G. Dehmelt, Phys. Rev. 105, 1924 (1957).
- [16] William E. Bell, and Arnold L. Bloom, Phys. Rev. Lett. 6, 280 (1961).
- [17] Dmitry Budker, and Michael Romalis, Nature Phys. 3, 227 (2007).
- [18] William Happer, Rev. of Mod. Phys. 44, 169 (1972)
- [19] L. Lenci, S. Barreiro, P. Valente, H. Failache, and A. Lezama, Journal of Phys. B 45, 215401 (2012).
- [20] L. Lenci, A. Auyuanet, S. Barreiro, P. Valente, A. Lezama, and H. Failache, Phys. Rev. A 89, 043836 (2014)