

1. Identificação da Proposta

Título: Espectroscopia de ruído e sua aplicação em caracterização óptica de materiais.

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

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

2. Resumo da Proposta

A presente proposta visa realizar investigações experimentais, teóricas e simulações computacionais em problemas relacionados à espectroscopia de sistemas atômicos com intuito de aprimorar técnicas de caracterização óptica de materiais. A pesquisa a ser desenvolvida nesta proposta envolve o estudo da espectroscopia de um ensemble atômico através da análise do ruído de um sinal oriundo de uma célula contendo vapor de célio coerentemente preparado. Esse tema possui extremo interesse da engenharia devido à sua grande aplicabilidade tecnológica, como por exemplo, processo de espectroscopia de alta resolução livre de alargamento por potência e aplicações tecnológicas associadas às comunicações óticas. Além disso, o tema é bastante atrativo às ciências da natureza por envolver conceitos fundamentais de Física associados às características intrínsecas da luz que propiciam o desenvolvimento da ciência básica através de um maior entendimento da interação radiação-matéria. Através deste projeto, vimos solicitar uma bolsa mestrado junto à FACEPE para auxiliar na consolidação das atividades de pesquisa no Programa de Pós-graduação em Engenharia Física (PPENGFIS) sediado na Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Campus das Engenharias (UACSA-UFRPE). Essa proposta tem como objetivo desenvolver um estudo experimental e teórico da técnica de espectroscopia de ruído aplicada a ressonância coerente, sua possível aplicação na caracterização óptica de materiais, como uma técnica espectroscópica de alta resolução, e no desenvolvimento de novos magnetômetros ópticos. Com isso, acreditamos que o projeto carrega um aspecto bastante inovador, pois o mesmo propicia a integração entre a pesquisa de conceitos básicos em espectroscopia coerente e óptica não-linear e seus impactos em aplicações na engenharia, metrologia e na ciência de materiais. Neste sentido, a consolidação dessa linha de pesquisa no PPENGFIS terá um papel fundamental no desenvolvimento científico da região e na consolidação do ambiente de inovação do polo industrial de Suape.

3. Introdução

O estudo de sistemas atômicos coerentemente preparados tem revelado diversos fenômenos interessantes. Um deles é o aprisionamento coerente de população [1] (**CPT**, *Coherent Population Trapping*) observado pela primeira vez por Alzetta et al [2]. Tal fenômeno deve-se ao bombeamento do sistema atômico num estado específico de superposição coerente dos níveis fundamentais do sistema, o qual não absorve radiação. Esse estado é denominado de "estado escuro". A partir de então, diversos estudos e observações relacionados ao CPT foram realizados [3-7]. Uma consequência direta desse efeito é o cancelamento da absorção de luz pelo ensemble atômico, mesmo que os campos envolvidos estejam ressonantes com o meio. Essa ressonância de transparência é denominada de transparência eletromagneticamente induzida [8] (**EIT**, *Electromagnetically Induced Transparency*), a qual foi observada primeiramente por Boller et al [9] em uma amostra de vapor de Estrôncio. Além dessa transparência poder ser explicada com base no fenômeno de CPT, outras interpretações foram dadas para esse efeito, como, por exemplo, devido a uma interferência quântica destrutiva entre os dois caminhos possíveis de absorção envolvendo estados vestidos do sistema átomo-campo [10]. Um resultado importante associado ao EIT é que, na mesma região espectral onde ocorre o cancelamento da absorção devido à interferência quântica destrutiva, podem ocorrer interferências construtivas. Essas interferências construtivas afetam as suscetibilidades não-lineares de ordens mais altas no campo elétrico, fazendo com que seu valor aumente algumas ordens de grandezas [11] e seja possível estudar ótica não-linear no regime de baixas intensidades [12]. A maioria dos fenômenos coerentes está associada com o aprisionamento coerente de população e o cancelamento da absorção da luz. Contudo, em certas condições, a interação coerente pode aumentar a absorção do meio na ressonância. Esse fenômeno, que pode ser considerado o oposto a EIT, é denominado Absorção Eletromagneticamente Induzida (**EIA**, *Electromagnetically Induced Absorption*). O EIA foi previsto e observado pela primeira vez por Lezama e colaboradores em 1998 [13]. Um efeito similar também pode ser observado no caso de um único laser na presença de um campo magnético, neste caso denominado Hanle-EIA [14, 15]. O aumento de absorção do meio ocorre devido à transferência espontânea de coerência dos estados excitados para os estados fundamentais [16, 17]. Na EIA temos a possibilidade de medir velocidade de grupo negativa para pulsos de luz, ou seja, propagação de pulso "superluminal", como comentado em [18, 19]. Muito recentemente, foi mostrado que é possível observar o armazenamento

de luz no meio atômico também no regime de EIA [20], como foi feito em EIT. Isto representa uma potencial aplicação desse tipo de fenômeno coerente em informação quântica.

Outra aplicação bastante relevante desses efeitos e que será fruto de nossa investigação neste projeto é que, devido à interação radiação-matéria, as propriedades da luz podem ser modificadas após essa interação. Estas modificações podem ser medidas por uma técnica chamada espectroscopia de ruído. Esta técnica espectroscópica de alta resolução foi apresentada por Yabusaki e colaboradores [21] para estudar o espectro de absorção das linhas D1 e D2 de átomos de rubídio e césio. Desde a sua introdução, um grande número de experimentos de espectroscopia têm sido abordado em células de vapor. Entre os diversos trabalhos, citamos as referências [22-26] nas quais foi utilizada esta técnica para observar correlações e anticorrelações nas flutuações de dois feixes de laser depois de interagir com um vapor atômico à temperatura ambiente na condição de EIT. Devido ao efeito Doppler, a interpretação dos sinais observados torna-se consideravelmente mais complicada [26]. Uma interpretação mais clara do processo, com uma comparação direta entre a teoria e experiência, é obtida utilizando conjuntos de átomos frios para realizar tais medidas de correlação, uma vez que estes sistemas não têm praticamente nenhum alargamento Doppler e as diferentes transições podem ser facilmente isoladas umas das outras. Nessa linha, nosso grupo investigou uma técnica para os espectros de correlação que não sofrem alargamento por potência [27,28]. Por outro lado, o desenvolvimento dessa técnica e sua generalização aos demais tipos de espectros, bem como sua aplicação na caracterização óptica de materiais ainda não foi implementada. Desta forma, esse projeto propõe lançar luz sobre pontos que continuam em aberto, tais como, a análise da técnica aplicada à ressonância do tipo EIA, em vapor atômico, e a possível aplicação em diversas outras técnicas espectroscópicas, tais como em espectroscopia Raman e Infravermelho. Além disso, tal técnica poderá auxiliar no desenvolvimento de novas estratégias para o desenvolvimento de metrologia óptica de alta resolução, através da construção de novos magnetômetros.

4. Objetivos

4.1 Geral

- Analisar e caracterizar a aplicação da técnica de espectroscopia de ruído à ressonância do tipo EIA e sua possível utilização como técnica de caracterização óptica de materiais.

4.2 Específicos

- Obter o espectro de ruído das ressonâncias EIA e EIT;
- Estudar a dependência da largura da ressonância EIA com a potência dos feixes de luz no espectro de ruído e comparar com os resultados já conhecidos para a ressonância do tipo EIT;
- Comparar a relação sinal-ruído do espectro tradicional de EIT e EIA com os espectros obtidos com a técnica de espectroscopia de ruído;
- Avaliar a possibilidade de implementação da técnica de espectroscopia de ruído em sinais obtidos em espectroscopia Raman e Infravermelho.

5. Metodologia

Para estudar os aspectos descritos na introdução e nos objetivos, iremos montar um aparato experimental composto por duas células contendo vapor de césio na qual iremos incidir dois feixes de luz proveniente de um laser de diodo. Para controlar a frequência de um dos feixes usaremos um modulador acusto-óptico o qual servirá também para modular a amplitude dele. Já para a medição e aquisição do sinal utilizaremos dois detectores de baixo ruído que foram construídos no laboratório de manipulação coerente de átomos e luz do IFUSP, os quais foram doados para realização destes experimentos, e um osciloscópio de velocidade 200 MHz que faz parte do patrimônio da UACSA-UFRPE. Todos esses dados serão armazenados e analisados em um microcomputador. Especificamente, iremos medir o sinal DC e AC da corrente em cada detector em função do tempo. De posse do sinal DC seremos capazes de analisar a largura dos espectros de EIT e EIA em função da potência dos feixes para caracterizar o alargamento sofrido devido à potência do feixe de bombeio. Após uma caracterização do sinal DC, iremos observar a saída AC do detector para levantar o espectro de ruído através da função de correlação para cada condição experimental desejada. É importante notar que com todos os resultados em mãos poderemos analisar as correlações em diversas frequências de análise, visto que a série temporal armazenada nos fornece a informação para qualquer frequência de análise. Em paralelo à realização do experimento nos dedicaremos a elaborar um modelo teórico que explique qualitativa e quantitativamente os resultados experimentais. A construção deste modelo será fundamental para nos guiar na melhor interpretação dos fenômenos físicos que regem a dinâmica deste sinal. Além disso, a elaboração de uma simulação numérica será de suma importância para auxiliar o modelo teórico e também para resolver exatamente algumas equações que não possuem soluções analíticas.

Após avaliação da aplicação da técnica de espectroscopia de ruído ao sinal de EIA iremos analisar a possibilidade de aplicação desta técnica aos sinais obtidos através da espectroscopia Raman e Infravermelho. A avaliação dessa possibilidade será fundamental para o desenvolvimento de uma nova forma de caracterização óptica de materiais, através de uma técnica mais robusta aos alargamentos por potência. Isso garantirá uma maior precisão na medida das larguras das ressonâncias em cada faixa espectral e, conseqüentemente, uma maior precisão na caracterização do material analisado.

6. Aderência aos critérios de Priorização

6.1. Reserva de bolsas para Cursos Novos.

O programa de pós-graduação em Engenharia Física (PPENGFIS), vinculado à Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA-UFRPE), está iniciando suas atividades em 2019.1. O PPENGFIS foi aprovado na 181ª reunião do CTC-CAPEs em dezembro de 2018.

6.2. Apoio diferenciado à pós-graduação em Engenharias.

O projeto está vinculado ao programa de pós-graduação em Engenharia Física, sediado na UACSA-UFRPE, pertencente à grande área de Materiais da CAPES.

6.3. Projeto em temas estratégicos para o desenvolvimento do estado - Arranjos produtivos locais (APLs) do estado: Metalmeccânico de Suape.

Este projeto será desenvolvido no Programa de Pós-graduação em Engenharia Física (PPENGFIS) da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA-UFRPE), Campus das Engenharias, que é situado na cidade do Cabo de Santo Agostinho-PE. O desenvolvimento deste projeto é fundamental para a consolidação das atividades de pesquisa na cidade do Cabo de Santo Agostinho implicando em um ambiente propício para o desenvolvimento tecnológico do polo industrial de Suape e, em particular, para o APL Metalmeccânico de Suape. Desta forma, o desenvolvimento de uma nova técnica espectroscópica para caracterização de materiais é de inegável importância para este relevante setor do polo industrial de Suape. Além disso, compreendemos que o fato de estarmos contribuindo para uma formação sólida dos estudantes da área de tecnologia, implicará numa melhor estrutura do Estado acarretando numa maior possibilidade de atração grandes empreendimentos na área industrial e tecnológica onde o PPENGFIS está situado e, em especial, para o setor Metalmeccânico de Suape. De fato, o maior gargalo enfrentado pelos Estados da federação para atrair os empreendimentos de grande porte é a falta de mão de obra especializada. Então, a nossa contribuição na formação de excelentes quadros nas áreas tecnológicas implicará também em um ganho social significativo pelos fatos já citados.

7. Resultados Esperados

Conforme explicitado nos objetivos e na metodologia, as correlações e anticorrelações observadas entre dois feixes de luz que interagem com um vapor atômico coerentemente preparado ainda não foram completamente compreendidas. Desta forma, pretendemos obter resultados experimentais e teóricos que caracterizem a dependência da largura de EIA, obtida a partir do espectro de ruído, em função das potências dos feixes, do ângulo entre os eles e em função dos diâmetros dos feixes; a dependência das correlações e anticorrelações na condição de EIA e fora dela, caracterizando os fatores responsáveis pela transição de um regime para o outro. Pretendemos compreender a técnica e identificar possíveis vantagens na aplicação dela ao sinal de EIA e utilizar essas vantagens no desenvolvimento de novas estratégias para a metrologia óptica. Por fim, pretendemos construir um modelo teórico e a simulação numérica para essas situações de modo a permitir uma melhor compreensão desta técnica espectroscópica e sua possível aplicação em outros sinais comumente utilizados na caracterização óptica de materiais, tais como sinais de espectroscopia Raman e Infravermelho. A aplicação da espectroscopia de ruído associada às técnicas Raman e Infravermelho poderá possibilitar uma maior precisão na caracterização óptica de materiais.

8. Cronograma de Atividades

Atividades	1º Semestre	2º Semestre	3º Semestre	4º Semestre
Revisão e atualização bibliográfica.	X	X	X	X
Disciplinas.	X	X		
Elaboração do modelo teórico para análise do espectro de ruído dos sinais.		X	X	
Montagem do experimento para o estudo da espectroscopia de ruído aplicada ao sinal de EIA e realizar a comparação com o resultado obtido para EIT.		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] G. Alzetta, A. Gozzini, L. Moi, and G. Orriols, Nuovo Cimento B 36, 5 (1976).
- [3] R. M. Whitley and C. R. S. Jr., Phys. Rev. A 14, 1498 (1976).
- [4] S. Wang, D. G. Ducreay, R. Pina, M. Yan, and Y. Zhu, Phys. Rev. A 61, 033805 (2000).
- [5] V. Milner and Y. Prior, Phys. Rev. Lett. 80, 940 (1998).
- [6] J. Parker and C. R. Stroud, Phys. Rev. A 41, 1602 (1990).
- [7] F. T. Hioe and C. E. Carroll, Phys. Rev. A 37, 3000 (1988).
- [8] M. Fleischhauer, A. Imamoglu, and J. P. Marangos, Rev. Mod. Phys. 77, 633 (2005).
- [9] K.-J. Boller, A. Imamoglu, and S. E. Harris, Phys. Rev. Lett. 66, 2593 (1991).
- [10] Y. Q. Li and M. Xiao, Opt. Lett. 51, 4959 (1995).
- [11] S. E. Harris, J. E. Field, and A. Imamoglu, Phys. Rev. Lett. 64, 1107 (1990).
- [12] S. E. Harris and L. V. Hau, Phys. Rev. Lett. 82, 4611 (1999).
- [13] A.M.Akulshin, S.Barreiro, e A.Lezama. Phys. Rev.A, 57:2996, 1998.
- [14] F. Renzoni, S. Cartavela, G. Alzetta, e E. Arimondo. Phys. Rev. A, 63:065401, 2001.
- [15] 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.
- [16] A.V. Taichenachev, A.M.Tumaikin, e V.I.Yudin. Phys. Rev. A, 60:011802, 2000.
- [17] J.B. Kim, K. Kim, H.S. Moon, M.Kwon, e H.D.Park. J. Korean Phys. Society, 39:859, 2001.
- [18] A.M. Akulshin, S. Barreiro, e A. Lezama. Phys.Rev. Lett, 83:4277, 1999.
- [19] A.M. Akulshin, A. Cimmino, e G.I.Opat. Quantum Electron, 32:567, 2002.
- [20] A. Lezama, A.M. Akulshin, A.I. Sidorov, e P. Hannaford. arXiv:physics/0506199v1.
- [21] T. Yabuzaki, T. Mitsui, and U. Tanaka, Phys. Rev. Lett. 67, 2453 (1991).
- [22] Y. Xiao et al., Phys. Rev.A 80, 041805 (2009).
- [23] G. A. Ariunbold, Y. V. Rostovtsev, V. A. Sautenkov, and M. O. Scully, J. Mod. Opt 57, 1417 (2010).
- [24] H. Li, V. A. Sautenkov, T. S. Varzhapetyan, Y. V. Rostovtsev, and M. O. Scully, J. Opt. Soc. Am. B 25, 1702 (2008).
- [25] V. A. Sautenkov, Y. V. Rostovtsev, and M. O. Scully, Phys. Rev. A 72, 065801 (2005).
- [26] L. S. Cruz et al., Eur. Phys. J. D 41, 531 (2007).
- [27] H. M. Florez, L. S. Cruz, M. H. G. de Miranda, R. A. de Oliveira, J. W. R. Tabosa, M. Martinelli, and D. Felinto, Phys. Rev. A 88, 033812 (2013).
- [28] D. Felinto, L. S. Cruz, R. A. de Oliveira, H. M. Florez, M. H. G. de Miranda, P. Nussenzveig, M. Martinelli, and J. W. R. Tabosa, Opt. Exp. 21, 1512 (2013).