UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física

PROJETO DE PESQUISA

Estudo estatístico em sistemas não lineares: interação matéria-radiação e circuitos eletrônicos caóticos acoplados

COORDENADOR:

Martine Chevrollier

Dezembro de 2021

Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho - UACSA
Rua Cento e Sessenta e Três, 300 – Garapu
54518-430 Cabo de Santo Agostinho/PE
www.ppengfis.ufrpe.br

I- IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO

1- Título
Estudo estatístico em sistemas não lineares: interação matéria-radiação e circuitos eletrônicos caóticos acoplados

2- Vigência	
Início previsto (mês/ano):	01/2021
Término previsto (mês/ano):	12/2024

3- Classificação da área do projeto (classificação definida pelo CNPq)	
Nome da área :	Ciências exatas e da Terra
Número do código:	1.00.00.00-3
Nome da sub-área :	Física
Número do código:	1.05.00.00-6
Nome da especialidade:	Ótica
Número do código:	1.05.02.02-5

4- Linhas de pesquisa do PPENGFIS contempladas no projeto	
☐	Materiais Nanoestruturados
☐	Materiais para aplicações ambientais, energéticas e industriais
☐	Metrologia e Instrumentação
X	Espectroscopia coerente e óptica não linear
X	Controle e dinâmica não linear

5- Palavras-chaves (máximo 5 palavras)	
• Propagação da luz	• sistemas caóticos
• Estatística não-normal	• Dinâmica não linear
• Ótica não linear	

Cabo de Santo Agostinho, 4 de fevereiro de 2022

Coordenador: [Autor]
(SIAPE: [Nº de Siape])

6- Participantes docentes:

Nome:	Martine Chevrollier
CPF:	20148705863
E-mail:	martine.chevrollier@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	◯ NÃO ◯ SIM Se sim, qual nível?:
Função:	Coordenador ☒ Colaborador ☐

Nome:	Marcos Oriá
CPF:	16605977491
E-mail:	marcos.oria@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	◯ NÃO ◯ SIM Se sim, qual nível?: 2
Função:	Coordenador ☐ Colaborador X

Nome:	Sérgio Barreiro
CPF:	
E-mail:	sergio.barreiro@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	◯ NÃO ◯ SIM Se sim, qual nível?:
Função:	Coordenador ☐ Colaborador X

Nome:	Weliton Martins
CPF:	
E-mail:	weliton.martins@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	◯ NÃO ◯ SIM Se sim, qual nível?:
Função:	Coordenador ☐ Colaborador X

II- DETALHAMENTO DO PROJETO

1. Resumo

O projeto aqui apresentado visa participar da implementação, na UFRPE/UACSA, de laboratórios de pesquisa experimental. Dentre as linhas de pesquisa a serem desenvolvidas, estamos particularmente interessados nos aspectos relacionados ao estudo da dinâmica de circuitos eletrônicos caóticos acoplados, assim como à luz e às suas interações com meios atômicos ressonantes, por eles proporcionarem comportamentos dinâmicos e estatísticos modelos para uma grande variedade de sistemas naturais e artificiais.

Usaremos circuitos caóticos acoplados como modelo para estudar o comportamento dinâmico de eventos raros, a ocorrência de fenômenos emergentes e para aplicações como reservoir computing. Os sistemas experimentais permitirão variar o número de circuitos acoplados e os parâmetros do(s) acoplamento(s), como o coeficiente e o sentido de acoplamento entre eles.

Investigaremos propriedades estatísticas da luz em regime não linear de interação com átomos, estudando e caracterizando a evolução de um campo incoerente de luz que se propaga em um vapor atômico ressonante. Uma das motivações para investigar a estatística de fótons interagentes é estudar estatísticas não-normais na ampla perspectiva de conectar esses estudos com as propriedades gerais de sistemas complexos. Caracterizaremos as propriedades estatísticas de um campo aleatório (padrão de speckles) através da distribuição (PDF) e da função de correlação ($g^{(2)}$) da sua intensidade. Serão investigadas configurações com um ou dois feixes lasers incidindo sobre uma célula contendo um vapor atômico ressonante. Serão analisadas as distribuições de intensidades luminosas resultando da interação desse(s) feixe(s) com o meio não-linear, com possíveis aplicações em imagens, manipulação de luz e caracterização de materiais.

2. Introdução

O projeto aqui apresentado visa participar da implementação, na UFRPE/UACSA, de laboratórios de pesquisa experimental. Dentre as linhas de pesquisa a serem desenvolvidas, estamos particularmente interessados nos aspectos relacionados ao estudo da dinâmica de circuitos eletrônicos caóticos acoplados, assim como à luz e às suas interações com meios atômicos ressonantes, por eles proporcionarem comportamentos dinâmicos e estatísticos modelos para uma grande variedade de sistemas naturais e artificiais.

Sistemas caóticos acoplados têm sido usados para estudar e compreender eventos extremos e coletivos encontrados na natureza e em atividades humanas, como terremotos, picos neuronais e crises financeiras [1]. Usaremos circuitos caóticos acoplados como modelo para determinar as condições de sincronização e estudar o comportamento dinâmico resultante dependendo do tipo de oscilador, da presença de ruído, heterogeneidade e topologia da rede de elementos não lineares acoplados. Estamos particularmente interessados em investigar a dinâmica desses sistemas em função do número de osciladores acoplados, do coeficiente de acoplamento entre eles [2].

A propagação da radiação eletromagnética em meios não homogêneos apresenta uma grande diversidade de comportamentos e sua descrição representa um modelo para problemas em várias áreas do conhecimento, sendo particularmente adaptado para estudos de comportamentos estatísticos não normais, característicos de sistemas complexos. Mais particularmente, a propagação e a difusão da luz em vapores atômicos é uma ferramenta privilegiada para implementar testes do comportamento de sistemas complexos e não-lineares (por exemplo ondas gigantes (rogue waves), localização de Anderson e lasers randômicos), devido às fortes e estreitas susceptibilidades do vapor. A inhomogeneidade do meio de propagação pode originar de suas propriedades geométricas [3] ou ser devido à sua resposta espectral à irradiação luminosa [4]. Temos realizado estudos das consequências dessa resposta espectral na estatística espacial [4-6] e na evolução espectral [7] de fótons espalhados em um vapor atômico ressonante, em um regime linear de interação radiação-matéria.

Mais recentemente, temos nos interessado pelas propriedades estatísticas da luz em regime não linear de interação com átomos, estudando e caracterizando a evolução de um campo incoerente de luz que se propaga em um vapor atômico ressonante [8]. Uma das motivações para investigar a estatística de fótons interagentes é estudar estatísticas não-normais na ampla perspectiva de conectar esses estudos com as propriedades gerais de sistemas complexos. Caracterizamos as propriedades estatísticas de um campo aleatório (padrão de speckles) através da distribuição (PDF) e da função de correlação ($g^{(2)}$) da sua intensidade. Partindo de uma distribuição normal de campos, observamos a evolução do PDF e de $g^{(2)}$ para comportamentos super- ou sub-térmicos, dependendo de um único parâmetro de controle que permite passar continuamente de um para outro.

3. Objetivos

Geral:

Os objetivos deste projeto são:

i) Estudar e caracterizar a dinâmica de sistemas não lineares escolhidos.

ii) Estudar e controlar a resposta espectral do meio material na estatística espacial de fótons espalhados em um vapor atômico ressonante, em regime linear ou não linear da interação radiação-matéria.

Específicos:

i) Estudar e caracterizar a sincronização de circuitos caóticos Gauthier-Bienfang e Colpitts acoplados;

ii) investigar o acoplamento e a sincronização de circuitos modelos para sistemas neurais, em vários regimes de acoplamento e configurações topológicas;

iii) manipular a estatística de padrões de luz;

iv) investigar configurações com uma ou duas distribuições de intensidade de luz incidindo sobre uma célula contendo um vapor atômico ressonante.

4. Metodologia

i) Estudo da dinâmica de circuitos eletrônicos não lineares.

Estudaremos a dinâmica de circuitos eletrônicos regidos por equações não-lineares. Serão montados circuitos com elementos permitindo reproduzir essas equações e gravaremos as séries temporais das variáveis a serem analisadas. Os sistemas a serem mais particularmente estudados são circuitos eletrônicos caóticos sincronizados, procurando classificar seu comportamento não linear em função de coeficientes de acoplamento, número de sistemas acoplados e sentido dos acoplamentos (uni-, bi- ou multi-lateral). A resolução numérica das equações regindo o sistema é parte imprescindível da análise e da caracterização das medidas experimentais. Sistemas não-lineares acoplados constituem um modelo acessível para o estudo de propagação em neurônios que iniciamos a partir do nosso interesse pela estatística não-normal exibida por sistemas complexos [9].

ii) Estudo das propriedades de um campo de luz em um vapor atômico ressonante.

Serão realizadas experiências permitindo a observação e a manipulação da estatística de padrões de speckles modificados pela interação com um vapor atômico não linear. A montagem de base consiste em enviar um padrão de speckles, produzido pela passagem de um feixe laser através de um difusor comercial ou por um modulador de fase, para uma célula ótica contendo um vapor atômico quente. Ambas a entrada e a saída do padrão são detectadas por uma câmera CCD, cujo tratamento das

imagens permite construir a distribuição de intensidade e a função de correlação do campo. Serão investigados o papel da absorção não linear e a evolução para um regime de "colapso" [10] onde as distribuições são estacionárias sob a ação dos efeitos (dispersivos e absorsivos) das interações "atrativas" e "repulsivas" entre fótons, em função da frequência e da potência da radiação.

Simulações numéricas devem orientar a elaboração de procedimentos experimentais e permitir a interpretação de resultados experimentais. Usaremos a linguagem Python para desenvolver rotinas simulando a propagação e a interação de um campo incoerente com átomos de um vapor diluido.

5. Resultados esperados

Um novo grupo de pesquisadores em física experimental está em fase de formação no campus novo da Universidade Federal Rural de Pernambuco no Cabo de Santo Agostinho (UACSA). O projeto aqui apresentado visa participar da implementação, nesse novo campus, de laboratórios de pesquisa experimental onde essa equipe desenvolverá atividades de pesquisa e de orientação de estudantes, contribuindo para o desenvolvimento técnico-científico de Pernambuco e para a formação de recursos humanos qualificados. Estudantes dos cursos de Engenharia Eletrônica e Elétrica da UACSA estão engajados em trabalhos neste tema, assim como estudantes do Mestrado em Engenharia Física que iniciou suas atividades no primeiro semestre de 2019. Esses estudantes poderão assim aperfeiçoar sua formação básica nos nossos laboratórios, adquirindo familiaridade e habilidades com dispositivos e técnicas experimentais como osciloscópios, placas e programas de aquisição, sistemas de detecção óticos e eletrônicos, tratamento de imagens e desenvolvimento de simulações numéricas, além de, particularmente os estudantes de pós-graduação, se depararem com problemas concretos a serem resolvidos. Destacamos aqui também a familiarização com a lingua inglesa, através da leitura de livros e artigos científicos, da prática oral a ser incentivada nas apresentações orais e da convivência com eventuais pesquisadores colaboradores/visitantes no laboratório. Pelo fato da UACSA oferecer cursos de formação em engenharia (civil, materiais, mecânica, elétrica e eletrônica) e ser inserida no polo portuário de Suape, essa qualificação adicional dos estudantes representa um caminho para o desenvolvimento científico e tecnológico de Pernambuco, assim como permite vislumbrar parcerias com o setor produtivo local.

Finalmente, salientamos que os resultados das investigações serão publicados em revistas científicas e apresentados em eventos científicos regionais, nacionais e internacionais, contribuindo para incrementar o potencial científico-tecnológico da UACSA, em termos de produção científica e de formação de recursos humanos qualificados.

6. Cronograma de atividades

Semestre Atividade	1	2	3	4	5	6	7	8
I	x	x	x	x	x	x	x	x
II	x	x	x	x	x	x	x	x
III	x	x	x	x	x	x	x	x
IV	x	x	x	x	x	x	x	x
V		x	x	x	x	x	x	x

Atividade I	**Elaboração de códigos de simulações numéricas**
Atividade II	**Análise de resultados numéricos**
Atividade III	**Montagens experimentais**
Atividade IV	**Aquisição e análise de resultados experimentais**
Atividade V	**Redação de artigos**

7. Apoio financeiro e/ou institucional

Edital 15/2018 – PRPPG-UFRPE – 12.000,00 R$

Edital Universal MCTIC/CNPq n.º 28/2018 – 10.000,00 R$

8. Referências

[1] L. M. Pecora and T. L. Carroll, “Synchronization in chaotic systems,” Phys. Rev. Lett. **64**, 821–824 (1990).

[2] Robson Vieira, Weliton S. Martins, Sergio Barreiro, Rafael A. de Oliveira, Martine Chevrollier, Marcos Oriá, Synchronization of a nonlinear oscillator with a sum signal from equivalent oscillators, Chaos, Solitons and Fractals **153**, 111581 (2021).

[3] P. Barthelemy, J. Bertolotti, and D. S. Wiersma, "A Lévy flight for light", Nature **453**, 495 (2008).

[4] N. Mercadier, W. Guérin, M. Chevrollier and R. Kaiser, "Lévy flights of photons in hot atomic vapors", Nature Physics **5**, 602 (2009).

[5] M. Chevrollier, N. Mercadier, W. Guerin and R. Kaiser, "Anomalous photon diffusion in atomic vapors", European Physical Journal D **58**, 161 (2010).

[6] N. Mercadier, M. Chevrollier, W. Guerin, and R. Kaiser , "Microscopic characterization of Lévy flights of light in atomic vapors" , Phys. Rev. A **87**, 063837 (2013).

[7] J.C. de A. Carvalho, H.L.D. de Souza Cavalcante, M. Oriá, M. Chevrollier, and T. Passerat de Silans, "Redistribution of light frequency by multiple scattering in a resonant atomic vapor", Phys. Rev. A **91**, 053846 (2015).

[8] S.B. Alves, H.L.D. de S. Cavalcante, G.F. de Oliveira Jr., T.P. de Silans, I. Vidal, M. Chevrollier, and M. Oriá, "Controlling the intensity statistics of speckle patterns: from normal to sub-thermal or super-thermal distributions", Phys. Rev. A **99**, 033838 (2019).

[9] M. Chevrollier, and M. Oriá, "Model for neural signaling leap statistics", Journal of Physics: Conference Series **285** (2011) 012044.

[10] K. Moll, A. L. Gaeta, and G. Fibich, "Self-Similar Optical Wave Collapse: Observation of the Townes Profile", Phys. Rev. Lett. **90**, 203902 (2003).