

Estatística da propagação e difusão de luz em meios não-lineares para caracterização de materiais e aplicações em dispositivos óticos

1. Introdução

O estudo e a compreensão dos mecanismos da propagação de um campo eletromagnético em um meio material é imprescindível em uma variedade de áreas da ciência, tanto básicas como aplicadas. Por exemplo, é essencial a descrição da propagação e da difusão da radiação em meios inhomogêneos, para desenvolvimento de técnicas e interpretação de informação obtida da luz detectada em materiais biológicos [Nolte2011] e aplicações em medicina [Kazmi2015]; em astrofísica [Boldyrev2003] e em comunicações [Andrews2005]. Das primeiras experiências e interpretações de propagação da luz visível em dispositivos de material transparente (lentes, prismas,...) até as mais recentes propostas usando metamateriais e nanomateriais para manipulação das propriedades da luz, a diversidade de sistemas explorados reflete a diversidade das aplicações (sejam elas em física, biologia, ciência dos materiais ou aplicações tecnológicas em optoeletrônica ou comunicações). Por outro lado, dado os próprios avanços em ciência e engenharia dos materiais (nanopartículas [Reyna2017], metamateriais [Kivshar2018], vidros dopados [Ballato2017]) e de dispositivos tecnológicos óticos, como o desenvolvimento de moduladores de luz, tipo SLM (spatial light modulator) ou DMD (digital micromirror device), que podem ser associados a novas fontes de luz (lasers semicondutores, geração de pulsos ultra-curtos, etc) as possibilidades são ainda mais amplas. Entender a propagação, difusão e espalhamento da luz por meios materiais permite a caracterização *in-situ* de propriedades de materiais, assim como o desenvolvimento de técnicas e aplicações. Além de atender a demandas crescentes do setor produtivo e tecnológico que faz uso de radiação em diversas faixas do espectro electromagnético, estudos da interação entre luz e matéria resultam em modelos para estudos de comportamentos estatísticos anômalos, que são assinaturas típicas de sistemas não-lineares ou complexos, difíceis de serem simulados e implementados em laboratório [Solli2007].

Informações sobre o meio material atravessado pela luz podem ser investigadas tanto no feixe transmitido ("balístico") ou refletido, como na luz espalhada em meio inhomogêneo, caso de tecidos biológicos, suspensões, materiais compósitos, etc. A luz espalhada, que frequentemente é considerada como ruído indesejável a ser minimizado, vem se constituindo como uma nova ferramenta de caracterização de materiais de interesse tecnológico e biomédico, assim como de manipulação da luz, usando meios não-lineares, por exemplo.

Em nossas atuações investigativas em Física e Ótica Experimental, temos realizado em nossos laboratórios experiências para o estudo da interação entre a luz e vapores atômicos (sistema fundamental, onde a interação ocorre entre átomos com níveis de energia bem caracterizados e radiação ressonante). Vapores atômicos apresentam não-linearidades muito grandes, embora espectralmente estreitas, mas que permitem explorar uma gama muito rica de comportamentos com um único sistema, variando-se somente a frequência da luz. Desta forma dispomos de uma ferramenta privilegiada para implementar testes do comportamento de sistemas complexos. Sistemas como ondas gigantes (rogue waves) [Bonatto2011], localização de Anderson [Segev2013], lasers randômicos [Gomes2016] e outros sistemas não-lineares têm características estatísticas em comuns, que propomos investigar nos nossos experimentos de propagação de fótons em meios não-lineares.

O estudo proposto compreende duas linhas de investigação: a primeira se propõe estudar as modificações induzidas por luz na distribuição de campo eletromagnético por um meio não linear. Interações com o meio material modificam as correlações espaciais entre os fótons, que se comportam então como partículas interagentes, afastando-se ou aproximando-se uns dos outros, a depender do índice de refração não linear que eles próprios induzem no meio. A natureza, atrativa ou repulsiva, dessas interações pode ser controlada através de um único parâmetro, por exemplo, a frequência da luz. A caracterização dos efeitos resultantes na distribuição espacial dos fótons transmitidos fornece informações sobre os processos e o material que os intermediou. A caracterização das modificações das propriedades estatísticas de uma distribuição de intensidades (padrão de speckles) é mais sensível (particularmente no caso de material de comprimento pequeno ou de estudos em reflexão) do que a de um único feixe, cujo perfil espacial precisaria ser perfeitamente determinado e sobre o qual os efeitos das interações seriam muito sutis e pouco significativos. Pelo fato do índice de refração de um meio não linear depender da intensidade local da luz, a interação de uma distribuição aleatória de intensidades com tal meio resulta na criação de uma distribuição randômica de índice de refração no material, que pode espalhar luz com características eventualmente distintas (perfil espacial, frequência, etc) da luz que criou a inhomogeneidade espacial no meio, abrindo novas possibilidades de manipulação de luz com luz.

A segunda linha objetiva construir, via um dispositivo de modulação espacial de luz (LSM), um sintetizador de estatísticas para campos de speckles. Ambas as linhas têm como objetivos: i) obter informações sobre meios não lineares [Alves2019]; ii) manipular propriedades óticas de novos materiais; iii)

controlar o grau de coerência da luz para aplicações em imagens [Mosk2012, Redding2012]; iv) controlar campos de speckles para manipulação de partículas [Boiron1999, Volpe2014].

2. Objetivos

2.1. Geral

Caracterização dos efeitos, sobre as propriedades estatísticas de uma distribuição aleatória de campo eletromagnético (luz), da propagação e da difusão do campo em um meio material não linear, em função dos parâmetros da luz (intensidade e frequência) e do material (índice de refração complexo).

Estudo da propagação da radiação, particularmente a luz visível, em padrões espaciais com estatísticas não-normal, para aplicações diversas, particularmente em imagens e biologia.

2.2. Específicos

1) caracterizar, experimentalmente e numericamente, o efeito da propagação em um vapor atômico ressonante sobre as propriedades estatísticas de uma distribuição aleatória de luz (efeitos de dispersão e de absorção presentes em um meio real);

2) particularizar, experimentalmente e numericamente, a influência da absorção não-linear nas propriedades estatísticas (distribuição de intensidade e coerência espacial) de um campo eletromagnético incoerente propagando-se no ou refletido pelo meio;

3) procurar, experimentalmente e numericamente, as condições (de intensidade e frequência da luz, por exemplo) para observação do regime de "colapso" onde as distribuições obedecem leis de potência, com probabilidade de transmissão de intensidade obedecendo a mesma lei para baixas e altas intensidades;

4) estudar, experimentalmente e numericamente, o espalhamento de um feixe gaussiano por uma distribuição aleatória de índice de refração complexo criada por um padrão de speckles distinto;

5) procurar, experimentalmente e numericamente, produzir uma distribuição espacial de intensidade luminosa com características estatísticas predeterminadas. Padrões desejáveis podem ser: i) subtérmicos, onde a probabilidade de intensidades é distribuída de maneira mais homogênea das baixas às médias intensidades, e onde altíssimas intensidades, ou seja, altas densidades de fótons, são muito pouco prováveis; ii) supertérmicos, com probabilidade significativa de ter speckles com alta intensidade, ou com densidade de probabilidade em lei de potência. Ou seja, desenvolveremos técnicas para manipular a estatística de uma distribuição de intensidade da radiação.

3. Metodologia

O estudo consistirá de duas partes: uma experimental e uma numérica.

Na parte experimental:

- usaremos a radiação emitida por um laser de diodo, estabilizado em frequência através da estabilização da sua temperatura e da sua corrente de injeção. Uma distribuição aleatória de intensidade será produzida ao espalhar o feixe laser através de um difusor comercial: campos espalhados em direções diferentes interferem e criam um padrão de regiões claras (interferências construtivas) e escuras (interferências destrutivas), ou speckles, com distribuição Gaussiana de campo elétrico. Esse padrão de speckles será então enviado para uma célula contendo um vapor de átomos de césio, cuja temperatura, e consequentemente densidade de átomos, será controlada através da corrente de um forno especialmente construído para o fino controle da sua temperatura. O padrão de speckles transmitido pelo vapor será detectado por uma camera CCD. As imagens gravadas serão analisadas, construindo-se a distribuição de probabilidade e a função de correlação das intensidades, e as modificações observadas nestes interpretadas, com a ajuda de simulações numéricas, em termos das interações ocorrendo na célula entre a luz e os átomos.

- um feixe laser com perfil espacial Gaussiano atravessará o meio não linear modificado pelo padrão luminoso descrito acima. Seu perfil espacial transmitido será detectado por uma camera CCD e analisado.

- usaremos um Modulador Espacial de Luz para modificar de maneira controlada a distribuição espacial de intensidade de um feixe laser. O perfil será detectado por uma camera CCD e suas propriedades estatísticas analisadas e caracterizadas.

Na parte numérica, serão realizadas simulações dos processos de interação entre a luz e o meio não linear, levando-se em conta a dependência espacial do índice de refração não linear do vapor com a frequência e a intensidade da luz, e com a densidade do vapor. Escritos em linguagem Python, eles deverão gerar uma determinada distribuição de intensidade do tipo normal (Gaussiana) ou não-normal, dependendo do problema tratado e simular sua propagação nesse meio não-linear. Note-se que essa simulação permite calcular a evolução da distribuição espacial de fótons a cada passo dentro do meio, enquanto as experiências fornecem apenas a distribuição final de saída. A distribuição e a função de correlação da intensidade calculadas para a propagação em um comprimento idêntico ao comprimento da amostra experimental permitirão interpretar as medidas experimentais e ajustar os parâmetros do programa.

4. Aderência aos critérios de priorização

4.1. Reserva de bolsas para Cursos Novos

O Programa de Pós-graduação em Engenharia Física foi aprovado na 181ª reunião do CTC-CAPES em dezembro de 2018, e iniciará suas atividades no primeiro semestre de 2019.

4.2. Apoio diferenciado à pós-graduação em Engenharias

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

4.3. Projeto em temas estratégicos para o desenvolvimento do Estado:

Desenvolvimento de arranjos produtivos locais (APLs) do Estado (Porto Digital):

As atividades do projeto serão desenvolvidas no Campus das Engenharias_UACSA da Universidade Federal Rural de Pernambuco, localizado na cidade do Cabo de Santo Agostinho, próximo do complexo portuário e industrial de Suape. Essa localização foi estrategicamente escolhida para a implantação do campus, que iniciou suas atividades em 2014. Enquanto a região conta com vários cursos de formação a nível de técnico médio e superior, ela padece de programas de formação a nível de pós-graduação, desejáveis para e solicitados pelo setor industrial. Vagas reservadas para candidatos oriundos do setor tecnológico e produtivo já estão previstas no primeiro edital de seleção do Mestrado em Engenharia Física, publicado no início do mês de janeiro de 2019. A presença dessa Unidade da UFRPE representa uma oportunidade de desenvolvimento para a cidade do Cabo de Santo Agostinho e entornos. Com o início das atividades do Mestrado em Engenharia Física, desenvolvidas com orientadores pesquisadores da própria UACSA, emerge a possibilidade de intercâmbio e convivência com estudantes e pesquisadores, brasileiros e estrangeiros, criando um ambiente científico rico e motivador. Ademais, o presente projeto, propondo estudos com aplicações em materiais e dispositivos optoeletrônicos, tem forte potencial de colaboração com a estrutura do Porto Digital, com o qual já entramos em contato para formalizar um convênio a nível de graduação e de pós-graduação.

5. Resultados Esperados

O desenvolvimento das atividades desse projeto resultará: i) na formação de recursos humanos altamente qualificados para atuação no setor tecnológico e produtivo, assim como na academia; ii) na produção de documentos (relatórios, artigos publicados em revistas internacionais com alto fator de impacto); iii) em apresentações em conferências regionais, nacionais e internacionais; iv) em protocolos de manipulação de luz para caracterização de materiais e aplicações diversas. Nesses desenvolvimentos procuraremos desenvolver um protótipo e/ou patente, quando aplicações comerciais forem identificadas.

6. Cronograma de Atividades

Atividades	1º Semestre	2º Semestre	3º Semestre	4º Semestre
Revisão e atualização bibliográfica	X	X	X	X
Disciplinas	X	X		
Montagem da experiência		X	X	
Desenvolvimento e uso de simulações numéricas		X	X	X

Análise dos resultados			X	X
Elaboração de artigos				X
Relatório			X	X
Defesa da Dissertação				X

7. Referências Bibliográficas

[Alves2019] Samuel B. Alves, Hugo L. D. de S. Cavalcante, Gilson F. de Oliveira Jr., Thierry P. de Silans, Itamar Vidal, Martine Chevrollier, and Marcos Oriá, "Controlling the statistics of interacting photons: from normal to sub-thermal or super-thermal distributions", *Submetido Phys. Rev. A* (2019).

[Andrews2005] L. C. Andrews and R. L. Phillips, *Laser beam propagation through random media*, Vol. 52 (SPIE press Bellingham, WA, 2005).

[Ballato2017] J. Ballato *et al.*, "Glass and Process Development for the Next Generation of Optical Fibers: A Review", *Fibers* **5**, 11 (2017).

[Boiron1999] D. Boiron *et al.*, "Trapping and cooling cesium atoms in a speckle field", *The European Physical Journal D-Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics* **7**, 373 (1999).

[Boldyrev2003] S. Boldyrev and C.R. Gwinn, "Levy model for interstellar scintillations", *Phys. Rev. Lett.* **91**, 131101 (2003).

[Brockmann2006] D. Brockmann, L. Hufnagel, and T. Geisel, "The scaling laws of human travel", *Nature* **439**, 462 (2006).

[Kazmi2015] S. S. Kazmi *et al.*, "Expanding applications, accuracy, and interpretation of laser speckle contrast imaging of cerebral blood flow", *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism* **35**, 1076 (2015).

[Kivshar2018] Y. Kivshar, "All-dielectric meta-optics and non-linear nanophotonics", *National Science Review* **5**, 144 (2018).

[Mosk2012] A. P. Mosk, A. Lagendijk, G. Lerosey, and M. Fink, "Controlling waves in space and time for imaging and focusing in complex media", *Nature Photonics* **6**, 283 (2012).

[Nolte2011] D. D. Nolte, *Optical interferometry for biology and medicine*, Vol. 1 (Springer Science & Business Media, 2011).

[Redding2012] B. Redding, M. A. Choma, and H. Cao, "Speckle-free laser imaging using random laser illumination", *Nature Photonics* **6**, 355 (2012).

[Reyna2017] A.S. Reyna, C.B. Araújo, "High-order optical nonlinearities in plasmonic nanocomposites – a review", *Advances in Optics and Photonics* **9**, 720 (2017).

[Solli2007] D. Solli, C. Ropers, P. Koonath, and B. Jalali, "Optical rogue waves", *Nature* **450**, 1054 (2007).

[Volpe2014] G. Volpe, G. Volpe, and S. Gigan, "Brownian Motion in a Speckle Light Field: Tunable Anomalous Diffusion and Selective Optical Manipulation", *Sci. Rep.* **4** (2014).