

## Do caos a luz: a ciência do laser aleatório From chaos to light: the science of a random laser

<sup>1</sup>Erik Luiz Souza Alves, <sup>2</sup>Valdeci Mestre da Silva Júnior.

<sup>1,2</sup>Universidade Estadual da Paraíba, Patos. PB, Brasil.

**Resumo:** Laser aleatório é um dispositivo que tem por princípio fundamental amplificar e espalhar a luz por processos quânticos. Desde o seu desenvolvimento prático em 1994, tem sido fonte de pesquisa com diversos interesses, como em suas aplicações, como células fotovoltaicas, em processos de fotodegradação e até detecção de tecido cancerígeno ou efeitos como o confinamento da luz, com diferentes materiais e dimensões. Sua estrutura em conjunto aos mecanismos de absorção, emissão e espalhamento derivado de interações com nanopartículas ocasionam efeitos de interesse na área da espectroscopia e eletrônica. Nesse artigo pretendemos explicar o laser aleatório, abordando sua estrutura e física de funcionamento, além de tópicos acerca de sua história e aplicações.

**Palavras-chave:** Laser-aleatório, emissão, espalhamento.

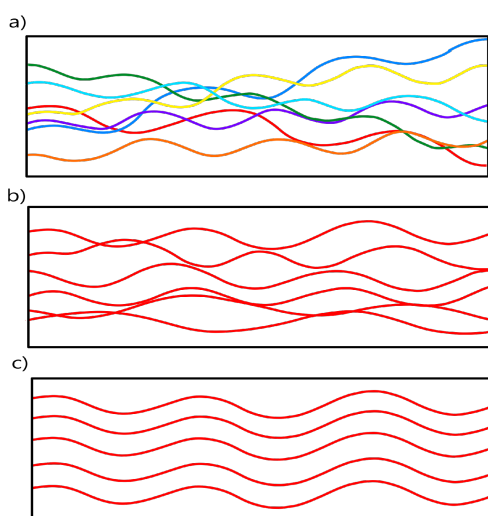
**Abstract:** Random laser is a device whose fundamental principle is to amplify and scatter light through quantum processes. Since its practical development in 1994, it has been the subject of research with diverse interests, such as its applications, such as photovoltaic cells, in photodegradation processes and even detection of cancerous tissue or effects such as light confinement, with different materials and dimensions. Its structure together with the mechanisms of absorption, emission and scattering derived from interactions with nanoparticles cause effects of interest in the area of spectroscopy and electronics. In this article we intend to explain the random laser, covering its structure and operating physics, as well as topics about its history and applications.

**Keywords:** Random laser, emission, scattering.

## Introdução

Lasers são dispositivos ópticos que realizam o processo de amplificação da luz através da emissão estimulada, emitindo essa luz monocromática, coerente e colimada, ou seja, com ondas eletromagnéticas de mesma frequência, fase e paralelas entre si, respectivamente.

Lasers são dispositivos ópticos que funcionam a partir do processo de amplificação da luz, com uma emissão coerente e monocromática, ou seja, ondas eletromagnéticas de mesma fase e com um único comprimento de onda.



*Figura 1: a) luz não coerente, não colimada e não monocromática; b) luz monocromática, colimada, mas não coerente; c) luz coerente, colimada e monocromática. Fonte: [autor].*

Os lasers vêm acompanhando muitas atividades humanas desde o seu desenvolvimento, sendo presente

em atividades como a medicina [1] e corte de precisão[2].

Podemos definir a estrutura do laser como um conjunto de basicamente três componentes [3], o meio ativo, onde ocorre os processos de emissão, uma fonte de energização para alimentar esse meio e cavidades ópticas que contribuem para o processo de emissão do laser e determinação da direção que vai ocorrer essa emissão.

A cavidade óptica além de contribuir para a amplificação, determina a orientação da emissão do laser. Em aplicações como a de corte, é desejado que o feixe se concentre em um único ponto, com o mínimo possível da luz sendo dispersa, para isso, a cavidade atua como um ressonador, realimentando o meio ativo e orientando o sentido de emissão da luz, no que é qualificado como um laser convencional.

Uma terceira característica é a direção em que a luz é emitida, o que separa o laser em dois tipos: o laser convencional no caso dessa luz emitida ser colimada, ou seja, ela segue em apenas uma direção, onde a divergência deve ser mínima, e o laser aleatório, onde a luz é emitida em múltiplas direções por meio de um processo de espalhamento.

Os lasers são primordialmente constituídos de três estruturas, uma fonte de energia, um material de ganho

e a cavidade de reflexão da luz, onde ocorrem processos quânticos que geram a emissão laser e seu direcionamento.

Na década de 1960, alguns anos após o primeiro laser convencional, foram desenvolvidos trabalhos que abordaram o processo de emissão da luz através dos mesmos processos de emissão, mas dessa vez com a luz sendo emitida direções aleatórias ao invés de um feixe concentrado, alterando a cavidade ressonante, no que é chamado de laser aleatório.

No laser aleatório, a luz emitida passa por processos de dispersão após a interação com um meio espalhador, que assume o lugar da cavidade óptica. O comportamento da luz em um meio desordenado é uma fonte de estudo de alto interesse, servindo como fonte de estudos para efeitos tais quais o confinamento da luz [4] e localização da luz [5], além de aplicações como fotocatalisadores [6], células fotovoltaicas [7], aplicações médicas [8] e sensores ópticos [9], ou mesmo para estudo de materiais [10], nos permitindo conhecer o comportamento derivado da interação do material com a luz.

Para o laser aleatório, a luz percorrerá por um meio não homogêneo, interagindo e sendo espalhadas por partículas suspensas. O comportamento da luz em um meio desordenado é uma fonte de estudo de

alto interesse, a partir dele que efeitos como o confinamento da luz [1], localização da luz [2] e uma maior eficiência laser [3] são analisados, além de aplicações como fotocatalisadores [4], em células fotovoltaicas [5], na medicina [6] e em sensores ópticos [7].

O laser aleatório é uma área nova e que ainda passa por muito desenvolvimento, havendo diversas maneiras de o utilizar, neste artigo pretendemos explicar o que é o laser aleatório de maneira simples, abordando a física de seu funcionamento, sua estrutura e as funcionalidades, além de um pouco de sua história, permitindo o entendimento do leitor sobre o tema, sem a necessidade de um conhecimento prévio.

## **História**

“LASER” é um acrônimo para Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, ou Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação, processo que foi introduzido em trabalhos de A. Einstein [11] ainda nas primeiras décadas do século XX. Com base nesses processos que J. P. Gordon, H. J. Zeiger e C. H. Townes, na década de 1950 construíram o maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) [12], um amplificador de microondas. Alguns anos após o desenvolvimento do primeiro maser, se é utilizado o mesmo princípio passando com ondas no espectro do visível [13], até que em

1960 é construído o primeiro laser pelo americano T. H. Maiman [14], se baseando nos trabalhos do A. L. Schawlow e C. H. Townes, utilizando um cristal de rubi sintético como elemento de emissão de luz.

O laser se fundamenta no processo de emissão estimulada, que foi introduzido em trabalhos de A. Einstein [8]. O desenvolvimento do laser aleatório se deu quase que em conjunto ao do laser convencional, esse que começou a ser desenvolvido de maneira teórica na década de 1950 partindo do maser (microwave amplifier by stimulated emission of radiation) [9], passando pôr a sua utilização com luz no espectro do visível [10] até o desenvolvimento do primeiro laser (light amplifier by stimulated emission of radiation), usando um cristal de rubi sintético como elemento de emissão de luz, em 1960 por T. H. Maiman [11].

Enquanto os estudos do laser convencional continuavam, Ambartsumyan *et al* [15], em 1966, trabalhou um dispositivo laser com partículas espalhadoras ao invés dos espelhos, substituindo a cavidade de Fabry-Perot que era usado no laser convencional. Posteriormente Letokhov [16], que também havia participado do trabalho de Ambartsumyan, abordou a emissão da luz e o através do processo de emissão estimulada em um meio aleatório. Anos depois, Markushev *et al* [17] reportaram a ocorrência da

emissão estimulada em partículas de neodímio em pó de molibdato lantânio sódio, até que, com as contribuições de Gouerdard *et al* [18] ao analisar a ação do bombeio de um laser em cristais e pó de neodímio, e de Lawandy *et al* [19], ao estudar a ação do laser em um meio fortemente espalhador contendo uma solução de corante rodamina 640, metanol e nanopartículas de TiO<sub>2</sub> (Dióxido de Titânio) revestidas por uma camada de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Óxido de Alumínio) suspensas, ocorreram as primeiras demonstrações experimentais do laser aleatório.

Os trabalhos para o desenvolvimento do laser aleatório começaram alguns anos após o desenvolvimento do laser de rubi. Enquanto os estudos do laser convencional continuavam, Sorokin *et al* [12], em 1966, observou a ocorrência de emissão estimulada de alta intensidade em partículas de ftalocianina. Letokhov [13], em 1968, propôs as ideias pioneiras do comportamento da luz e o processo de amplificação em um meio aleatório. Anos depois, Markushev *et al* [14] reportaram a ocorrência da emissão estimulada em partículas de neodímio em pó de molibdato lantânio sódio. Posteriormente, com as contribuições de Gouerdard *et al* [15], analisando a ação do bombeio do laser em cristais e pó de neodímio, e de Lawandy [16], ao estudar a ação do laser em um meio fortemente espalhador contendo uma solução de corante rodamina 640,

metanol e nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  (Dióxido de Titânio) revestidas por uma camada de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Óxido de Alumínio) suspensas, ocorreram as primeiras demonstrações experimentais do laser aleatório.

O desenvolvimento do laser aleatório segue até hoje, onde continua sendo uma fonte de interesse em estudos e aplicações [20].

O laser aleatório continua sendo objeto de estudos e desenvolvimento [17], para diferentes aplicações e configurações e outros objetivos.

### **O processo de emissão laser**

O processo de emissão estimulada, que serve de base para o laser, é descrito nos trabalhos de Einstein [11], ele ocorre a partir de uma cadeia de processos de emissão estimulada, onde em decorrência a esses diversos processos, teremos uma amplificação da luz que resulta na emissão laser. Esse processo é proveniente da interação dos fótons com os átomos que compõem o material.

O acrônimo "LASER" surge da palavra Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, ou Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação, O processo de emissão estimulada é a base do funcionamento do laser, ele é descrito

nos trabalhos de Einstein [8], a partir de uma cadeia de processos de emissão estimulada obtemos a amplificação necessária para a emissão laser, proveniente da interação dos fótons com os átomos que compõem o material.

Podemos dividir o processo de emissão laser em três situações: absorção, emissão espontânea e emissão estimulada.

Tal processo de emissão laser é dividido em três situações: absorção, emissão espontânea e emissão estimulada.

Os fótons, pacotes de energia ou partículas de luz, carregam uma frequência de onda específica, onde a energia desse fóton é dada pelo produto da frequência de onda com uma constante chamada constante de Planck [3].

$$E = h \nu \quad (1)$$

Onde  $h$  é a constante de Planck (Aproximadamente  $6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ) e  $\nu$  a frequência da radiação.

O processo de absorção consiste em um de seus elétrons saltar de seu estado fundamental para um estado excitado [Fig. 2 e 3]. Para que esse processo ocorra, é necessário que a energia do fóton seja igual à diferença de energia entre os dois níveis. Caso ela não cumpra esse requisito, o fóton não será absorvido pelo átomo.



Esse processo energiza o átomo, onde ele, que inicialmente possuía uma certa energia  $E_1$ , após esse processo de absorção passará a possuir uma energia  $E_2$ , sendo ela a soma da energia inicial do átomo com a energia do fóton.

$$E_2 = E_1 + h\nu \quad (1)$$

A energia final após o processo de emissão como a diferença da energia do átomo em seu estado excitado e a energia  $h\nu$  do fóton emitido.

$$E_3 = E_2 - h\nu \quad (2)$$

No final,  $E_1$  será igual a  $E_3$  e o átomo emitirá um fóton com mesma energia do fóton absorvido e em uma direção aleatória [Fig. 2].

No final,  $E_1$  será igual a  $E_3$  e nesse processo de emissão espontânea o átomo emitirá um fóton com mesma frequência do fóton absorvido, mas em uma direção aleatória [Fig. 2].

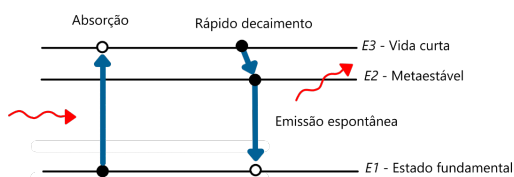


Figura 2: processo de absorção e emissão espontânea. Fonte: [autor].

Todavia, esse processo de emissão pode ser induzido a partir da incidência de um outro fóton em um átomo que já esteja previamente no

estado excitado, no que é chamado de emissão estimulada.

A interação desse segundo fóton com átomo servirá como gatilho para o processo de emissão do fóton, porém ele permite que essa emissão seja direcionada pelo fóton gatilho, então ao invés de ser emitido em uma direção aleatória, ele seguirá na mesma direção do fóton que induziu a emissão.

Além de direcionar o fóton, a emissão estimulada fará com que o átomo emita dois fótons ao invés de um, como no processo de emissão espontânea, onde os dois fótons terão a mesma energia do fóton gatilho.

Por meio desse processo, é possível obter um controle da direção de emissão e da energia do fóton emitido, prevenindo perdas como emissão não radioativas que podem ocorrer na emissão espontânea.

A ação da emissão estimulada ocorre se o átomo já estiver previamente no estado excitado, o que faz com que caso ocorra outra incidência, esse outro fóton vai interagir de tal forma que ele induz o processo de emissão, agindo como um gatilho. Com isso, agora é emitido dois fótons, com a mesma frequência do fóton gatilho, em vez de um como no processo de emissão espontânea, além de que esses dois fótons irão seguir a

mesma direção do segundo fóton gatilho [ Fig. 3].

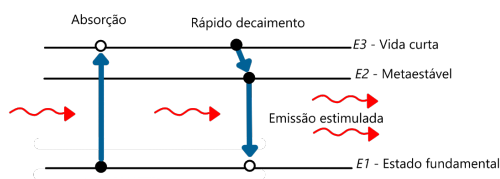


Figura 3: processo de absorção e emissão estimulada. Fonte: [autor].

Para o funcionamento do laser, esse processo ocorre de maneira que gere um efeito cascata, onde os fótons emitidos atingem outros átomos já excitados e assim desencadeia uma série de processos de emissão estimulada em um efeito cascata onde o material excitado é constantemente energizado, esse processo ocorre para que tenhamos um número maior de átomos no estado excitado do que átomos no estado fundamental.

Ao atingir esse estado, a emissão laser ocorrerá, sendo esse processo chamado de inversão de população. Chamamos de limiar laser a quantidade de energia necessária para que a emissão estimulada supere a emissão espontânea e outros tipos de perdas, como uma emissão não radiativa, no material [3].

Inicialmente temos mais átomos no estado fundamental do que no estado excitado, quando o número de átomos no estado excitado supera o número de átomos no estado fundamental, temos uma inversão de

população. A quantidade de energia necessária para que essa inversão ocorra é chamada de limiar laser, onde nesse momento, os processos de emissão estimulada superam a emissão espontânea e outros tipos de perdas, como uma emissão não radiativa, no material [3].

### Estrutura do laser

Os processos de absorção e emissão, necessários para a emissão laser, ocorrem em uma parte chamada de meio ativo, essa é uma das três partes que constituem o laser.

O processo necessário para a emissão laser ocorre no meio ativo, essa é uma das três partes que constituem o laser.

Podemos separar o laser aleatório em três estruturas fundamentais, o já citado meio ativo, uma fonte de bombeio para o sistema e as cavidades de reflexão da luz.

O meio ativo, como já citado, se trata do material que vai realizar os processos de absorção e emissão laser, além de determinar a frequência em que a luz será emitida.

Outra estrutura fundamental é uma fonte de energia para o meio ativo, responsável por excitar os átomos, devendo ser capaz de gerar a inversão de população no sistema.

A cavidade óptica é o elemento que vai definir a forma com que a luz

laser será emitida. O laser convencional e o laser aleatório diferem na forma de emissão em por causa da escolha dessa cavidade.

A fonte de bombeio é responsável por excitar os átomos, devendo ser capaz de gerar a inversão de população no sistema.

O meio ativo, já citado, é o material que irá sofrer o processo de excitação exercido pela fonte de energia, ocorrendo os processos de absorção, emissão espontânea e emissão estimulada.

A cavidade de reflexão da luz é o elemento que vai definir a forma com que a luz laser será emitida. O laser convencional e o laser aleatório diferem na forma de emissão em derivação a construção dessa cavidade.

Para o laser convencional, a cavidade atua como um ressonador óptico, sendo nomeada de cavidade ressonante, consistindo em dois espelhos localizados na extremidade do meio ativo, um desses espelho é totalmente refletor enquanto o outro é parcialmente refletor, ou seja, irá refletir apenas parte dos fótons emitidos pelo meio ativo e permitirá a passagem de outros [Fig. 4].

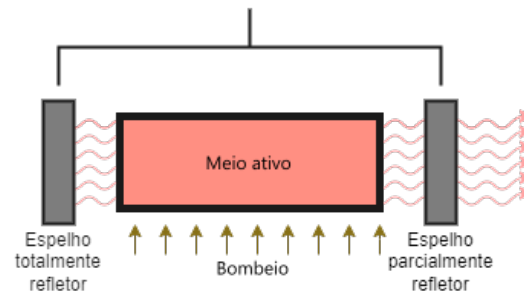
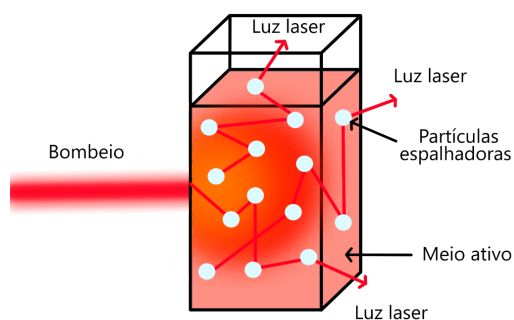


Figura 4: estrutura básica de um laser convencional. Fonte: [autor].

O laser aleatório não possui o mesmo sistema de espelhos que o laser convencional, para ele o ideal é que a luz seja espalhada o máximo possível. Para que isso ocorra, no laser aleatório é utilizado partículas espalhadoras como pseudo-cavidades para que a interação da luz com essas pseudo-cavidades ocorra diversos eventos de dispersão, resultando em um confinamento da luz no meio ativo por mais tempo, o que permite que ela realize os processos de absorção e emissão diversas vezes, realizando a amplificação, até enfim sair, ocorrendo a emissão do laser aleatório [Fig. 5].

O laser aleatório não possui espelhos na mesma configuração do laser convencional, para ele o ideal é que a luz seja espalhada o máximo possível. Para que isso ocorra, no laser aleatório é utilizado nanopartículas como pseudo-cavidades para que ocorra o espalhamento da luz que percorre o meio ativo durante o processo de amplificação e assim resulte na emissão do laser aleatório [Fig. 5].





*Figura 5: estrutura básica de um laser aleatório. O meio ativo interage com os fótons realizando os processos de absorção e emissão, enquanto as partículas espalhadoras irão espalhar a luz emitida. Fonte: [autor].*

### **Funcionamento do laser aleatório**

O objetivo fundamental do laser aleatório é realizar o processo de amplificação da luz em conjunto ao espalhamento. Esse processo ocorre quando a radiação eletromagnética, proveniente da fonte de bombeio, incide sobre um meio heterogêneo que contém o meio ativo e as partículas espalhadoras.

A fonte de bombeio, seja um laser convencional, um bombeio elétrico [21] ou algum outro dispositivo que ofereça essa energia, mantém o processo de excitação constante por meio da realimentação. O meio ativo compõe uma solução heterogênea junto das cavidades ressonantes. O meio ativo mais comum, sendo até mesmo usado para o desenvolvimento

do primeiro laser aleatório, é um corante orgânico como meio ativo em uma solução líquida, como a rodamina 640 [21] e a rodamina 6G [22], mas outros tipos de soluções podem ser usadas como meio ativo, seja ela líquida, sólida ou mesmo gasosa, a depender do objetivo almejado.

A rodamina 640 foi usada no desenvolvimento do primeiro laser aleatório prático em 1994, junto de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  (Dióxido de Titânio) recobertas por uma camada de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Óxido de Alumínio) [19]. As nanopartículas atuam como meio espalhador que auxiliam no processo de amplificação e espalhamento da luz no material.

Outros materiais além do dióxido de titânio podem assumir o papel de meio espalhador, como o  $\text{ZnO}$  (óxido de zinco) [23],  $\text{WO}_3$  (Trióxido de Tungstênio) [24], e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Óxido de Ferro) [25].

A luz, enquanto estiver no meio, realiza diversos processos de espalhamento enquanto estiver no meio, percorrendo caminhos aleatórios como tais quais o movimento browniano [3]. Durante esses diversos processos de espalhamento e de emissão, ela percorre um caminho que separa um evento de espalhamento do outro, onde a média dessa distância é chamado caminho livre médio de espalhamento.

Para que a emissão do laser ocorra e seja intensificada, é necessário que o caminho livre médio de espalhamento seja menor que a dimensão das partículas espalhadoras [26], caso contrário, haveria redução na eficiência da emissão laser.

A geração de luz por meios aleatórios que constitui o laser aleatório possibilita uma vasta possibilidade de aplicações, como a detecção de tecidos com câncer e tecidos saudáveis [27], além dos já citados sensores ópticos baseados no laser aleatório [9] e a capacidade de estudar nanomateriais e suas propriedades em interação com a luz [10].

A luz descreve diversos processos de espalhamento percorrendo caminhos aleatórios como descreve o movimento browniano [3]. Durante esses diversos processos de espalhamento e de emissão, a luz descreve um caminho livre médio de espalhamento.

O caminho livre médio de espalhamento descreve a distância média percorrida pelo fóton entre cada evento de espalhamento, onde para uma maior eficiência laser, ele deve ser menor ou no mesmo nível de grandeza que a espessura das nanopartículas, o que implica em uma maior quantidade de eventos de espalhamento.

## **Conclusão**

O desenvolvimento na área do laser aleatório continua ocorrendo

ainda é uma rica fonte de estudo e com grande potencial de evolução. Em 2007, foi desenvolvido um laser aleatório em uma dimensão, o *Random Fiber Laser*, ou RFL [28], que passou a ser um dos tópicos de desenvolvimento na área [29], além das já citadas anteriormente.

Os tópicos atuais e o que já foi desenvolvido demonstra a capacidade do laser aleatório como uma ferramenta para o desenvolvimento humano, com aplicações, mecanismo de estudo e desenvolvimento científico.

O desenvolvimento na área do laser aleatório continua ocorrendo ainda é uma rica fonte de estudo e com grande potencial de evolução. Em 2007, foi desenvolvido um laser aleatório em uma dimensão, o *Random Fiber Laser*, ou RFL [24], que passou a ser um dos tópicos de desenvolvimento na área [25], além de outros tópicos como diferentes materiais para a construção e estratégias para controle do laser que continuam sendo estudados [26].

Nesse artigo pretendemos explicar de maneira o que é o laser aleatório de maneira simples, trazendo noções da física de seu funcionamento, estruturas, as funcionalidades que podemos ter com ele e um pouco de sua história, situando o leitor sobre o tema a necessidade de um conhecimento prévio.

## Agradecimentos:

Agradecemos a FAPESQ e ao CNPq pelo apoio financeiro.

## Referências

- [1] Ronald Sroka, Herbert Stepp, Georg Hennig, Gary M. Brittenham, Adrian Rühm e Lothar Lilge, **"Medical laser application: translation into the clinics"**, J. Biomed. Opt. 20(6) 061110 (2015).
- [2] Eltawahni, H. A., Benyounis, K. Y., & Olabi, A.-G., **"High Power CO<sub>2</sub> Laser Cutting for Advanced Materials – Review"**, *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier. (2016).
- [3] Demtröder W. *Atoms, Molecules and Photons: An Introduction to Atomic-, Molecular- and Quantum Physics*. 1<sup>a</sup> Ed. Springer, 2006.
- [4] T. Tanabe, M. Notomi, E. Kuramochi, A. Shinya e H. Taniyama, **"Trapping and delaying photons for one nanosecond in an ultrasmall high-Q photonic-crystal nanocavity"**, *Nature Photonics*, 1, (2007), 49 - 52.
- [5] Alexander D. Mirlin, **"Statistics of energy levels and eigenfunctions in disordered systems"**, *Phys. Rep.*, 326 (2000) 259 - 382.
- [6] K. Awazu, M. Fujimaki, C. Rockstuhl, J. Tominaga, H. Murakami, Y. Ohki, N. Yoshida e T. Watanabe, **"A Plasmonic Photocatalyst Consisting of Silver Nanoparticles Embedded in Titanium Dioxide"**, *J. Am. Chem. Soc.*, (2008) 130 (5), 1676-1680.
- [7] M. P. Genovese, I. V. Lightcap e P. V. Kamat, **"Sun-Believable Solar Paint. A Transformative One-Step Approach for Designing Nanocrystalline Solar Cells"**, *ACS Nano* 2012, 6, 1, 865–872.
- [8] F. Lahoz, A. Acebes, T. González-Hernández, S. de Armas-Rillo, K. Soler-Carracedo, G. Cuesto e V. Mesa-Infante, **"Random lasing in brain tissues"**, *Organic Electronics*, 75, (2019) 105389.
- [9] Ignesti, E., Tommasi, F., Fini, L. et al. **"A new class of optical sensors: a random laser based device"**. *Sci Rep* 6 (2016) 35225.
- [10] E. Jimenez-Villar, V. Mestre, P. C. De Oliveira e G. F. de Sa, **"Novel core-shell (TiO<sub>2</sub>@Silica) nanoparticles for scattering medium in a random laser: higher efficiency, lower laser threshold and lower photodegradation"**, *Nanoscale* 5, 12512-12517 (2013).

- [11] A. Einstein, “**Zur Quantentheorie der Strahlung**”, Phys. Zeitschrift, 18 (1917) 121.
- [12] J. P. Gordon, H. J. Zeiger, e C. H. Townes, “**Molecular Microwave Oscillator and New Hyperfine Structure in the Microwave Spectrum of NH<sub>3</sub>**” Phys. Rev., 95, (1954) 282–284.
- [13] A. L. Schawlow e C. H. Townes, “**Infrared and Optical Masers**”, Phys. Rev., 112, (1958) 1940.
- [14] MAIMAN, T. **Stimulated Optical Radiation in Ruby**. Nature 187, 493–494 (1960).
- [15] R. V. Ambartsumyan, N. G. Basov, P. G. Ktyukov e V. S. Letokhov. “**A Laser with a Nonresonant Feedback.**” IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-2, NO. 9 (1966).
- [16] Letokhov, Vladilen Stepanovich. “**Generation of Light by a Scattering Medium with Negative Resonance Absorption.**”, *Journal of Experimental and Theoretical Physics* (1968), 835 – 840.
- [17] V.M. Markushev, A. Zolindaki e C. M. Briskina, “**Luminescence and stimulated emission of neodymium in sodium lanthanum molybdate powders**”, Sov. J. Quant. Electron. 16 (1986) 281-283.
- [18] C. Guedard, D. Husson, C. Sauteret, F. Azuel e A. Migus, “**Generation of spatially incoherent short pulses in laser-pumped neodymium stoichiometric crystals and powders**”, J. Opt. Soc. Am. B 10 (1993) 2358 – 2363.
- [19] N. M. Lawandy, R. M. Bachandran, A. S. L. Gomes, E. Sauvain, “**Laser action in strongly scattering media**”, Nature 368 (1994) 436-438.
- [20] Anderson S.L. Gomes, André L. Moura, Cid B. de Araújo e Ernesto P. Raposo, “**Recent advances and applications of random lasers and random fiber lasers**”, Progress in Quantum Electronics, 78, (2021) 100343.
- [21] André L. Moura, Renato Barbosa-Silva, Christian T. Dominguez, Édison Pecoraro, Anderson S. L. Gomes, Cid B. de Araújo, “**Single bead near-infrared random laser based on silica-gel infiltrated with Rhodamine 640**”, J. Appl. Phys. 123, 133104 (2018).
- [22] L. Yang, G. Feng, J. Yi, K. Yao, G. Deng, and S. Zhou, “**Effective random laser action in Rhodamine 6G solution with Al nanoparticles**”, Applied Optics, 50, 13, (2011) 1816-1821.

[23] Thareja, R., Mitra, A., **“Random laser action in ZnO”**. *Appl Phys B* 71, 181–184 (2000).

[24] A .G. Ardakani, P. Rafieipour, **“Random lasing emission from WO<sub>3</sub> particles dispersed in Rhodamine 6G solution”**, *Physica B* 546 (2018) 49–53.

[25] A-Jarah, N.H., Wasfi, A.S. & Hamidi, S.M. **“Random laser performance by magneto-plasmonic nanoparticles”**. *J Opt* 52, 1381–1387 (2023).

[26] Diederik S. Wiersma, **“The physics and applications of random lasers”**, *Nature Physics* 4, 359 - 367 (2008).

[27] R.C. Polson e Z.V. Vardeny, **“Random laser in human tissues”**, *Applied Physics Letters* 85, 1289 (2004).

[28] C.J.S. de Matos, L.D.S. Menezes, A.M. Brito-Silva, M.A.M. Gamez, A.S.L. Gomes e C.B. de Araújo, **“Random fiber laser”**, *Phys. Rev. Lett.* 99 (2007) 153903.

[29] Xiangzhong Liu, Jing Luo, Jialiang Lv, Yuantong Chen, Peijun Yao, Chun Gu e Lixin Xu, **“Generation of multiwavelength cylindrical vector beams from a random fiber laser assisted with nonlinear amplifying**

**loop mirror”**, *Infrared Physics & Technology*, 140,(2024) 105416.