

# **Estudos de interferometria de estados quânticos da luz para aplicações em metrologia**

*Centro de Ciências Naturais e Humanas, Universidade Federal do ABC*

Santo André, SP, Brasil

## Resumo

O surgimento da física quântica no século passado, nos levou a uma revolução tecnológica com o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos e, consequentemente, suas aplicações em comunicação, computação, entre outras áreas. Contudo, apesar da mecânica quântica ser fundamental nos desdobramentos tecnológicos atuais, estes ainda são sistemas essencialmente clássicos, no sentido que características intrinsecamente quânticas (tais como superposição e emaranhamento) não se manifestam nas aplicações.

Nas últimas décadas, com o advento de abordagens da Teoria da Informação na descrição de sistemas quânticos, estamos desenvolvendo o início de uma nova geração de dispositivos tecnológicos, onde buscamos utilizar as propriedades intrinsecamente quânticas dos sistemas físicos em prol de vantagens em desempenho e eficiência. Esta abordagem tem sido considerada a segunda revolução quântica e, muitas vezes, denominada de *Tecnologias Quânticas 2.0*. De fato, as aplicações vão além da tecnologia de informação, abrangendo áreas como comunicação, metrologia, medicina, entre outras. No contexto da metrologia quântica, buscamos utilizar as propriedades quânticas de sensores e também de processos de medida para alcançar os limites últimos em precisão e sensibilidade.

Neste projeto, nosso intuito é estudar sistemas de medidas interferométricos que utilizam estados quânticos da luz, tanto do ponto de vista teórico quanto experimental. Estaremos avaliando diversas configurações distintas na busca de mapear adequadamente suas vantagens e limitações. Nesta contextualização estaremos trabalhando com ferramental teórico como a informação de Fisher e outras medidas para construir figuras de mérito para diferentes configurações interferométricas. A estudante terá a oportunidade de aprender de forma abrangente desde teoria de informação até óptica quântica, que permitirão que ela obtenha uma boa compreensão destas áreas e desenvolva habilidades práticas ao lidar com os sistemas que serão estudados. Além disso, ela participará do desenvolvimento dos trabalhos em nosso grupo como parte de um projeto maior que envolve protocolos quânticos aplicados a metrologia.

# 1 Introdução e Justificativa

A área de Informação Quântica avançou a passos largos nas últimas décadas, em especial, após Peter Shor [1] mostrar teoricamente que ao utilizar estados quânticos o problema de fatoração de números primos pode ser resolvido de forma eficiente. Esta previsão teórica incentivou o estudo mais aprofundado da mecânica quântica no processamento de informação. Além de campos diretamente relacionados como a criptografia e a computação, essa nova abordagem tem sido aplicada nas áreas mais diversas da física, química, engenharia e, até mesmo, biologia.

Entre as áreas que tem se beneficiado com esta abordagem, podemos citar a Metrologia [2], em que são questionados quais os limites últimos para a precisão de uma medida, dado o resultado da mecânica quântica do princípio de incerteza de Heisenberg. Neste campo, o uso de estados quânticos com compressão de ruído em uma de suas quadraturas (e excesso na quadratura ortogonal), que são denominados estados comprimidos (ou, do inglês, *squeezed states*) permitem alcançar sensibilidades muito mais expressivas. Um dos exemplos mais emblemático é o uso destes estados nos interferômetros do sistema LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*), que atestou experimentalmente a existência das ondas gravitacionais e vêm contribuindo com resultados interessantes em cosmologia.

A compressão é, de fato, uma redução da variância do ruído de um dado parâmetro do campo eletromagnético abaixo do chamado Ruído Quântico Padrão (QNL, do inglês *Quantum Noise Limit*). É possível obter este tipo de estado quântico a partir de estados coerentes por meio da interação da luz com vapor atômico coerentemente preparado [3], técnica que utilizamos em nosso laboratório. De fato, há outras técnicas que possibilitam a compressão de ruído, elas sempre se baseiam no uso de uma interação não linear (em geral, quadrática) da luz com algum meio (amostra atômica, cristal, fibra óptica, etc). Em nosso sistema, realizamos a compressão de ruído nas variáveis de polarização do campo eletromagnético, que são descritas por meio dos operadores de Stokes [4]. Tais operadores obedecem relações de comutação similar às dos operadores de momento angular [5] e, portanto, possuem relações de comutações mais elaboradas que os operadores de quadratura intensidade e fase do campo eletromagnético [6].

Neste projeto, iremos utilizar interferômetros e estados comprimidos de polarização para estimativas precisas de fase. Para tal, serão estudados diferentes tipos de interferômetros e os seus limites de precisão, tanto em uma descrição clássica quanto quântica. Iremos realizar essa avaliação em termos de parâmetros quantitativos, como informação de Fisher [7, 8] entre outras possibilidades, a fim de construir uma figura de mérito que estabeleça qual a melhor configuração e parâmetros a serem usados e que permitirão as aplicações destes sistemas em nosso laboratório no contexto de sensores e metrologia quântica.

## 2 Objetivos e Metas

Neste projeto, estamos interessados em uma das aplicabilidades do sistema de geração de estados comprimidos existente em nosso laboratório, por meio da demonstração que com o uso das propriedades quânticas dos estados comprimidos podemos melhorar a precisão de medida de uma dada grandeza física de interesse. A estudante já atua em nosso grupo há um ano como voluntária, durante este período, ela realizou um intenso plano de estudos cobrindo desde tópicos de física básica, uma vez que ela era uma estudante ingressante na UFABC, até alguns tópicos mais avançados associados a óptica quântica e teoria da informação. Atualmente, a estudante está em seu segundo ano da UFABC e concluiu muito bem todas as disciplinas obrigatórias do BC&T sugeridas na grade do curso, com ótimos conceitos. No quadrimestre a seguir, a aluna estará apta a cursar adequadamente as primeiras disciplinas obrigatórias do Bacharelado em Física. Dado os estudos realizados tanto no BC&T quanto orientados na Iniciação Científica, a aluna tem uma base sólida de conhecimentos para sua atuação tanto no laboratório (dado que as atividades presenciais foram retomadas na UFABC), quanto se aprofundando no seu tópico de pesquisa por meio de uma atuação mais ativa na programação de cálculos e previsões para nossos sistemas de interesse. Dessa forma, a aluna terá a oportunidade de atuar no laboratório, bem como para desenvolver habilidades de programação básica ao avançar com a iniciação científica.

No contexto da pesquisa associada ao projeto em si, investigaremos as possibilidades do uso de estados comprimidos de polarização em medidas de estimativa de fase em interferômetros, com especial interesse de verificar qual a máxima sensibilidade possível para cada configuração. Além do estudo teórico da questão, a aluna atuará no laboratório e montará os interferômetros e realizará as medidas em busca de verificar a conformidade de suas previsões com os dados experimentais. Acreditamos que esta vivência com o ambiente de laboratório e o aprendizado ao lidar com os diversos elementos ópticos e as boas práticas de pesquisa experimental serão extremamente salutar para a formação dela como uma jovem pesquisadora.

## 3 Metodologias

Este projeto se fundamenta no aprendizado por meio de três eixos principais: plano de estudos, atividades teóricas e atividades experimentais, que estão conectados entre si e permitem um aproveitamento mais efetivo do período de Iniciação Científica, além de criar uma rotina científica para a estudante desde o início de suas atividades. A seguir, vamos apresentar o que se pressupõe em cada um destes eixos:

**Plano de estudos:** Como mencionado anteriormente, como voluntária a estudante já fez um estudo de diversos tópicos relevantes associados ao eletromagnetismo e à mecânica quântica e também temas de óptica quântica associados ao seu projeto. Portanto, ela já está apta para avançar em estudos mais aprofundados. Neste projeto, propomos que os estudos dela estejam fortemente atrelados às diversas técnicas interferométricas, do ponto de vista da teoria, de informação e suas aplicações em processos quânticos, bem como em temas associados a teoria de informação, que serão essenciais para um entendimento mais profundo do que estará sendo trabalhado.

**Atividades teóricas:** A estudante deverá realizar uma série de cálculos relacionados a conceitos como Informação de Fisher, sensibilidade de interferômetros, estados comprimidos, etc para um melhor entendimento dos conceitos envolvidos em seu projeto. Em um segundo momento, seus cálculos estarão relacionados a simulações dos sistemas mais adequados e suas condições para o uso de estados comprimidos de forma a garantir a melhor figura de mérito para o processo. Nesta etapa, serão realizadas simulações numéricas utilizando os pacotes adequados da linguagem de programação **Python**, tais como o *Qutip*<sup>1</sup> para a estimativas dos parâmetros para o sistema existente em nosso laboratório.

**Atividades Práticas:** Com o retorno, sem restrições, às atividades presenciais na UFABC, poderemos ter a participação da estudante nas atividades de laboratório. Durante o período anterior, como voluntária, as atividades da estudante se restringiram ao campo teórico. Dessa forma, planejamos ter uma agenda bastante intensa de atividades no laboratório para a aluna ter o aprendizado detalhado dos diversos elementos ópticos e o seu uso nos aparatos experimentais. Além disso, a aluna desenvolverá um conhecimento mais profundo de seu tópico de estudo, por meio da vivência no laboratório cumprindo as diversas atividades que compõem o seu plano de trabalho da iniciação científica.

Obviamente, buscaremos equilíbrio entre as diversas atividades da iniciação científica com as disciplinas de graduação do BC&T e do Bacharelado em Física (que ela pretende iniciar em breve), que a aluna estará realizando durante a iniciação. De modo que, a iniciação científica não deverá sobrecarregar as atividades de graduação da estudante, mas sim motivar e aprimorar a sua experiência universitária, não apenas com a formação básica em ciência e tecnologia, mas também com os conceitos de uma área extremamente profícua e inovadora como a óptica quântica e suas aplicações. Nas próximas subseções, apresentaremos sucintamente os tópicos principais que serão trabalhados neste projeto de iniciação.

---

<sup>1</sup><http://qutip.org/>

### 3.1 Informação e Interferometria

Quando consideramos um sistema de medida, em geral, temos um processo em que estamos interessado em uma certa grandeza  $\theta$ , a qual não temos acesso diretamente, mas temos acesso a uma certa quantidade  $x_i$ , que é um dos possíveis valores de uma variável aleatória  $X_i$  e, podemos associar os valores  $x_i$  com a grandeza  $\theta$  por uma distribuição  $f(x_i|\theta)$ . Na prática, o valor de  $\theta$  não é conhecido e ele deve ser inferido por meio dos valores medidos  $x_i$  e a distribuição anteriormente mencionada. Podemos extrair a quantidade de informação que uma variável aleatória observável  $X_i$  transporta a cerca do parâmetro  $\theta$  (desconhecido) por meio da chamada **informação de Fisher** [7], que é definida por:

$$I_X(\theta) = \int_X \left( \frac{d}{d\theta} \log f(x|\theta) \right)^2 p_\theta(x) dx \quad (1)$$

Na expressão acima, a derivada  $\frac{d}{d\theta} \log f(x|\theta)$  é denominada função de *score* e descreve o quão sensível é o modelo, portanto, a informação de Fisher mede a sensibilidade do modelo de medida ponderada pelos possíveis valores da medida. Em nosso projeto, será uma medida importante para avaliar a sensibilidade dos diferentes configurações de interferômetros que iremos investigar. A estimativa de parâmetros que caracterizem a dinâmica de um processo é um elemento central em diversas questões científicas e tecnológicas e as soluções destas questões podem ser aprimoradas quando se utiliza as ferramentas quânticas [9]

Interferômetros são sistemas que podem ser utilizados para monitorar pequenas mudanças no índice de refração, rotações ou deslocamento de superfícies devido a vibrações mecânicas etc. Eles atuam transferindo a diferença de fase entre dois feixes de luz para uma mudança de intensidade observada na saída do interferômetro, que pode ser monitorada por um fotodetector [10]. Os interferômetros tem uma vasta gama de usos em áreas como espectroscopia e polarimetria, entre outras.

Existe uma variedade grande de interferômetros [11], na figura 1 exemplificamos alguns. A sensibilidade das configurações também é bastante diferente, como podemos ver na figura 1(d). Assim, em nosso estudo iremos considerar diferentes configurações para avaliar qual seria a mais adequada para o nosso sistema.

Além das configurações mostradas na figura 1, também temos um grande interesse em outros interferômetros, como por exemplo, o interferômetro de Mach-Zhender, que tem diversas aplicações em óptica quântica e também é utilizado em algumas montagens de nosso laboratório.

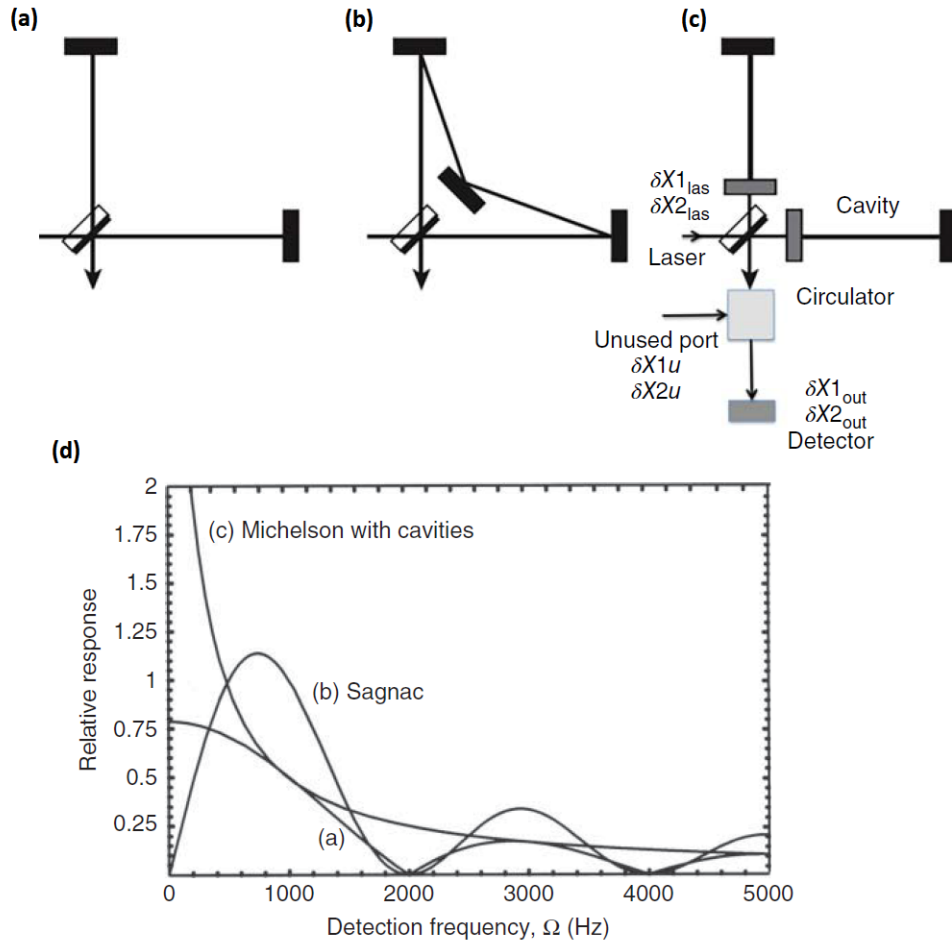


Figura 1: Interferômetros: (a) Michelson; (b) Sagnac; (c) Michelson com cavidade óptica. (d) Resposta espectral para pequenos deslocamento dos espelhos para as configurações de interferômetros indicados das figuras (a),(b) e (c). Figura extraída da Ref. [11]

Os resultados até aqui apresentados levam em conta feixes lasers, que costumam ser bem descritos por estados coerentes e, portanto, temos uma boa descrição deles em termos clássico. Contudo, resultados mais interessantes podem ser obtidos, se considerarmos estados comprimidos da luz, mas isso requer um tratamento quântico para o sistema, no qual a estudante irá trabalhar. Tanto no caso dos estados coerentes, quanto estados comprimidos estamos tratando os estados quânticos no contexto de variáveis contínuas (considerando as flutuações de campos de lasers contínuos ou pulsados intensos). Cabe aqui mencionar que podemos também estudar os fenômenos interferométricos no contexto de variáveis discretas, quando temos um regime de poucos fótons, como por exemplo, no caso de fontes que produzem pares de fótons emaranhados. Ressaltamos que a estudante atuará apenas no contexto de variáveis contínuas em sua pesquisa no projeto que estamos apresentando. Em nosso laboratório, contamos também com uma fonte de pares de fótons emaranhados, a qual poderá ser utilizada nos estudos de interferometria e metrologia quântica, que estão planejados para projetos futuros, como uma expansão desta linha de pesquisa.

### 3.2 Estados Comprimidos de Polarização

Se consideramos estados coerentes com número de fótons médio  $\langle n \rangle$  para um intervalo de detecção largo, a distribuição de Poisson pode ser aproximada por uma distribuição Gaussiana com um desvio padrão de  $\pm\sqrt{\langle n \rangle}$ . Estados comprimidos possuem uma distribuição de flutuações em torno do valor médio que é sub-poissoniana e, portanto, exibe uma distribuição do ruído quântico mais estreita que de estados coerentes com o mesmo número médio de fótons. Está é uma das razões pelas quais tem havido um grande interesse no uso de estados comprimidos em sistemas de medidas.

Em nosso laboratório, estamos trabalhando com compressão de ruído nos parâmetros de polarização do campo eletromagnético [12], que pode ser feita em termos dos operadores de Stokes:

$$\begin{aligned}\hat{S}_0 &= \hat{a}_x^\dagger \hat{a}_x + \hat{a}_y^\dagger \hat{a}_y = \hat{n}_x + \hat{n}_y; \\ \hat{S}_1 &= \hat{a}_x^\dagger \hat{a}_x - \hat{a}_y^\dagger \hat{a}_y = \hat{n}_x - \hat{n}_y; \\ \hat{S}_2 &= \hat{a}_x^\dagger \hat{a}_y + \hat{a}_y^\dagger \hat{a}_x; \\ \hat{S}_3 &= i(\hat{a}_y^\dagger \hat{a}_x - \hat{a}_x^\dagger \hat{a}_y).\end{aligned}\tag{2}$$

Nestas expressões  $a_x$  e  $a_y$  representam os operadores de destruição para as polarizações ortogonais  $x$  e  $y$ ;  $S_0$  o operador da intensidade do feixe e  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ , podem ser representados na esfera de Poincaré, como indicado na figura 2(a).

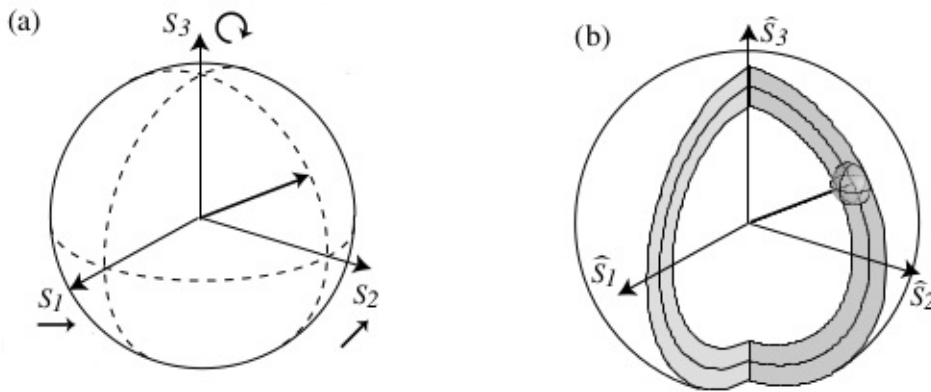


Figura 2: (a) Descrição clássica de parâmetros de Stokes na esfera de Poincaré e (b) descrição quântica dos operadores de Stokes com a representação das flutuações de um estado coerente de polarização [11]

As relações de comutação entre operadores de Stokes são dadas por:



$$\begin{aligned} [\hat{S}_0, \hat{S}_i] &= 0; \quad i=1,2,3, \\ [\hat{S}_i, \hat{S}_j] &= 2\epsilon_{ijk}\hat{S}_k. \end{aligned} \quad (3)$$

Se utilizamos uma descrição em que o operador é representado pelo seu valor médio e as suas flutuações, ou seja,  $\hat{S}_i = \langle S_i \rangle + \delta S_i$ , temos uma representação como na figura 2(b) para um estado coerente de polarização, onde o ponto central é dado por:

$$\hat{S}_1^2 + \hat{S}_2^2 + \hat{S}_3^2 = \hat{S}_0^2 + 2\hat{S}_0, \quad (4)$$

Não há apenas uma forma de definir compressão de ruído para estados de polarização [13], sendo ainda um tema de estudo bastante interessante. Contudo, uma das formas mais comuns e, em geral, utilizada em estudos de metrologia quântica é considerar uma relação análoga aos estados comprimidos de quadratura [6] em que o estado é denominado comprimido quando o ruído de um ou mais operadores de Stokes é menor que o valor que corresponderia a um estado coerente, neste caso em vez de uma esfera (estado coerente), teremos um elipsoide para as flutuações, como na figura 3.

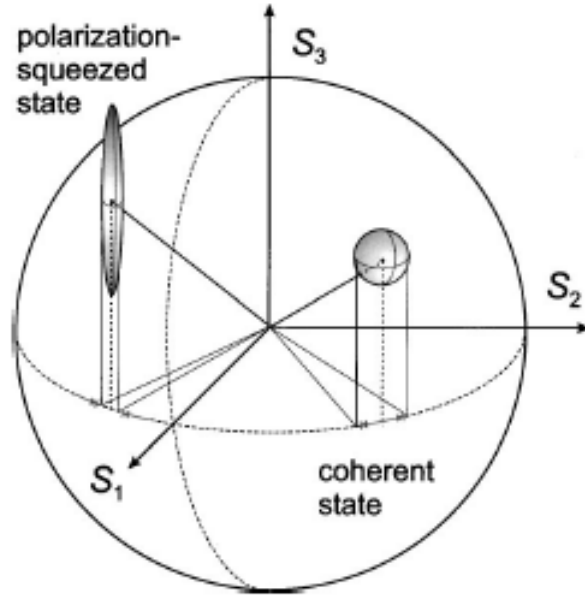


Figura 3: Representação de estados coerente e comprimido de polarização na esfera de Poincaré. Figura obtida de [11].

É possível obter a compressão de polarização após interagir a luz com vapor atômico de um metal alcalino em uma célula de vidro a temperatura ambiente. Podemos determinar um par de polarizações elípticas ortogonais nas quais os parâmetros de Stokes correspondentes apresentam compressão. Este efeito está fortemente relacionado ao fenômeno de autorrotação de polarização (PSR, do inglês *Polarization Self-Rotation*) [3].

Uma das grandes vantagens deste método é a sua relativa simplicidade e necessidade de poucos elementos na montagem experimental: um laser intenso e ajustável à transição atômica de interesse, elementos polarizadores para a preparação da polarização inicial e um sistema de detecção para medida do espectro de ruído após a interação da luz com os átomos. Em nosso laboratório, utilizamos rubídio ( $^{87}\text{Rb}$ ) como o meio atômico de interação. A célula de vidro contendo o meio atômico é envolvida por uma câmara, feita de  $\mu$ -metal, para isolamento de campo magnético, assim evitando desvios dos subníveis Zeeman devido a campos magnéticos espúrios. A densidade de átomos (que está diretamente associada à densidade óptica do meio) pode ser facilmente controlada aquecendo ou esfriando a célula, por meio de um forno. O esquema do aparato experimental [14] pode ser visto na figura 4

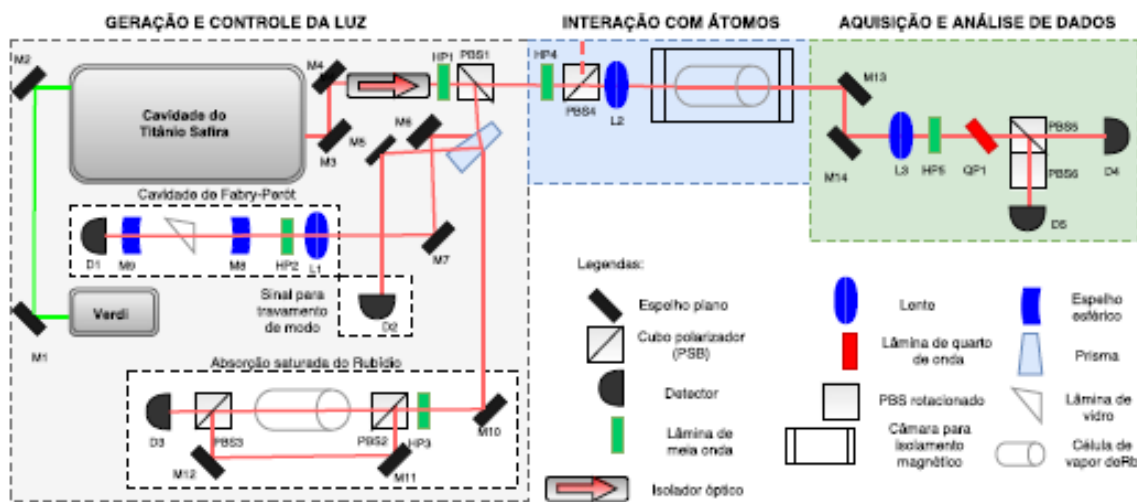


Figura 4: Esquema do aparato experimental para produção de estados de polarização comprimidos

Apresentamos, de forma geral, os principais elementos para realização do projeto de pesquisa, que envolve estudos de interferometria utilizando estados comprimidos da luz na busca de ampliar a sensibilidade de processos de medida. A aluna atuará nestes estudos tanto do ponto de vista teórico quanto experimental.

## 4 Plano de Trabalho e Cronograma

A aluna iniciou a sua graduação na UFABC em 2021, estudando nos seus primeiros dois quadrimestres em regime não presencial e sendo aprovada com ótimos conceitos em todas as disciplinas que se matriculou possuindo um Coeficiente de Rendimento (CR) de **3,6**. Durante esse período, além das disciplinas do BC&T, esteve também em contato com pesquisa em nosso grupo, na qual aprendeu diversos tópicos básicos de eletromagnetismo e física quântica, além

de tópicos mais avançados de óptica quântica.

Neste projeto, teremos a oportunidade de aprofundar os seus estudos iniciais e também permitir sua atuação no laboratório, iniciando a sua formação de uma perspectiva de experimentalista. A aluna já tem uma boa base para aplicar seus conhecimentos em simulações computacionais de estimativas dos estados comprimidos em interferômetros, bem como executar um plano denso de atividades de laboratório. Dessa forma, as atividades da estudante se estende por uma ampla gama de tarefas que permitirão avançar em seu aprendizado como uma jovem pesquisadora em formação.

Em nosso planejamento, no primeiro quadrimestre, a aluna além de simulações com estados comprimidos de polarização, também terá a oportunidade de realizar a montagem e o alinhamento de seus primeiros interferômetros usando luz laser convencional (estados coerentes), assim aprendendo sobre estes aparatos no laboratório e podendo fazer o paralelo entre os sistemas experimentais e o que já foi estudado teoricamente.

No segundo quadrimestre, ela poderá se dedicar aos conceitos relevantes de Teoria de Informação e realizar cálculos com informação de Fisher para cada tipo de interferômetro. Enquanto isso no laboratório, estará fazendo comparações entre os resultados com diferentes configurações de interferômetros. Além disso, iniciará as atividades com o aparato experimental de geração de estados comprimidos. Este sistema é compartilhado com outros estudantes de mestrado do grupo e, portanto, essa também será uma oportunidade para a estudante trabalhar em cooperação com alguns dos alunos mais seniores de nossa equipe.

No terceiro quadrimestre do projeto, a aluna já deve ter domínio dos sistemas previamente estudados e, portanto, poderá ter as primeiras medidas utilizando estados comprimidos nos interferômetros para as medidas de estimativas de fase. Esta etapa também deverá ser acompanhada da comparação com as simulações numéricas que foram desenvolvidas ao longo do projeto.

Este projeto permitirá o contato da estudante com tópicos de pesquisa muito atuais, enquanto ela avança em sua formação a partir de seus primeiros passos como pesquisadora em um ambiente científico bastante estimulante que é o nosso grupo, interagindo com outros docentes e estudantes da área de Informação Quântica da UFABC.

## Referências

- [1] I. L. Chuang M. A. Nielsen. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, 2000.
- [2] K.C. Tan and H. Jeong. Nonclassical light and metrological power: An introductory review. *Quantum Sci.*, 1:014701, 2019.

- [3] S Barreiro, P Valente, H Failache, and A Lezama. Polarization squeezing of light by single passage through an atomic vapor. *Physical Review A*, 84(3):033851, 2011.
- [4] Dennis H Goldstein. *Polarized light*. CRC press, 2016.
- [5] Natalia Korolkova, Gerd Leuchs, Rodney Loudon, Timothy C Ralph, and Christine Silberhorn. Polarization squeezing and continuous-variable polarization entanglement. *Physical Review A*, 65(5):052306, 2002.
- [6] Peter L. Knight Christopher C. Gerry. *Introductory Quantum Optics*. Cambridge University Press, 2004.
- [7] Roman Schnabel. Squeezed states of light and their applications in laser interferometers. *Physics Report*, 684, pages 1,54, 2017.
- [8] Josine Verhagen Raoul Grasman Alexander Ly, Maarten Marsman and Eric-Jan Wagenmakers. A tutorial on fisher information. *arXiv preprint arXiv:1705.01064v2*, pages 1–59, 2017.
- [9] R.L. de Matos Filho B.M. Escher and L. Davidovich. Quantum metrology for noisy systems. *Braz. J. Phys.*, 41:229, 2011.
- [10] W. Demtroder. *Laser Spectroscopy: Basic Concepts and Instrumentation*. Springer, 1981.
- [11] Hans-Albert Bachor and Timothy C Ralph. *A guide to experiments in quantum optics*. Wiley, 2004.
- [12] A. S. Chirkin. Polarization-squeezed light and quantum degree of polarization (a review). *Optics and Spectroscopy*, 119:397, 2015.
- [13] A. Luis and N. Korolkova. Polarization squeezing and nonclassical properties of light. *Physical Review A*, 74:043817, 2006.
- [14] Thiago H. D. Santos. Geração de estados da luz com compressão de ruído nos operadores de stokes. *UFABC*, 2018.