

# **Desenvolvimento de sistema de aquisição e análise de dados para caracterização de estados quânticos da luz**

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

Santo André, SP, Brasil

## Resumo

Grandes avanços científicos e tecnológicos tem sido obtidos a partir de um maior entendimento da Mecânica Quântica. Em especial, a inclusão do ponto de vista da Teoria da Informação na maneira de compreender os fenômenos quânticos possibilitou que se delineasse a área da informação quântica: um estado quântico que descreve um sistema físico possui toda a informação que se pode obter sobre tal sistema. Por meio da manipulação destes estados é possível realizar processamento, armazenamento e transmissão da informação de maneira mais eficiente do que a obtida por meios clássicos (que não se aproveitam das propriedades quânticas do sistema, tais como superposição e emaranhamento de estados). De fato, o desenvolvimento de manipulações precisas das propriedades dos estados quânticos tem permitido avanços para além da computação, com aplicações em metrologia, agricultura, medicina, entre tantas outras áreas.

Neste projeto de pesquisa de iniciação científica propomos um estudo sobre caracterização de estados quânticos da luz produzidos pela interação com meios atômicos em célula de vapor. Em especial, estamos interessados nas medidas da polarização destes estados por meio dos operadores de Stokes. O estudante estará diretamente envolvido na etapa de aquisição de dados do aparato experimental para a produção destes estados e auxiliará no desenvolvimento da interface computacional (via programação em Labview) para a análise dos dados obtidos. Devemos frisar que o aluno terá atividades tanto teóricas nos estudos sobre o processo de medida em quântica, caracterização de estados e tomografia quântica, quanto na parte experimental a partir montagem do sistema de medida e aquisição de dados em si.

Este projeto faz parte das metas do grupo no uso de estados comprimidos de polarização da luz para aplicações em esquemas de metrologia quântica de alta precisão e comunicação quântica. Além disso, buscamos estudar a possibilidade de obter estados emaranhados nestas variáveis de polarização; o emaranhamento é um fator chave para a maior eficiência de um grande número dos algoritmos quânticos propostos até agora. Portanto, a produção e manipulação destes estados permite o uso deste sistema físico para aplicações na demonstração de dispositivos para processamento de informação quântica e, consequentemente, seu uso na demonstração de protocolos quânticos.

# 1 Introdução e Justificativa

A área de Informação Quântica avançou rapidamente nas últimas décadas, em especial, após Peter Shor [1] mostrar teoricamente que a utilização estados quânticos na solução da fatoração de grandes números primos permitiria obter o resultado de forma mais eficiente; a tarefa é muito difícil de realizar com a tecnologia de computação atual e, por esta razão, a estratégia de compartilhamento de informação em sistemas de segurança eletrônicos na codificação de contas bancárias e cartões de créditos é baseada nesta limitação. A área de informação quântica ganhou maior notoriedade com as primeiras aplicações comerciais por meio de sistemas de criptografia, que usam fótons individuais e possibilita realizar protocolos com alto grau de segurança, muito maior do que pelos métodos clássicos usuais. Contudo, a busca por real processamento de informação quântica ainda é uma questão em aberto e de resposta árdua, pois temos desafios em verificar a viabilidade em relação às leis mais fundamentais da física e também diversas limitações de cunho tecnológico.

Dentre os diversos sistemas atualmente pesquisados como candidatos para processamento da informação quântica, nosso grupo de pesquisa optou átomos neutros, que tem recebido grande atenção devido a: (a) estrutura eletrônica relativamente simples e, ao mesmo tempo, versátil; (b) isolamento dos átomos dos efeitos do ambiente; (c) habilidade de controlar grande número de átomos (em especial, em amostras frias). Além disso, utilizamos a luz como elemento de interação com os átomos e que também é um ótimo meio para transmitir a informação, com máxima velocidade e baixa interferência do meio ambiente. O uso de campos eletromagnéticos intensos, contendo muitos fótons, é um caminho adequado para minimizar efeitos de perdas e aumentar a efetividade dos processos de interação. Desse modo, a abordagem escolhida em nosso grupo tem sido o uso de átomos neutros e luz [2] como portadores da informação, realizando procedimentos para a transferência dessa informação entre estes sistemas.

A evolução dos estados atômicos sob a influência de campos eletromagnéticos, quando devidamente controlados, sofre um forte efeito das chamadas “coerências” entre os estados. O uso destes fenômenos de maneira adequada, pode gerar a transferência da informação, inicialmente codificada na luz, para os átomos, e protocolos posteriores podem realizar o armazenamento e/ou o processamento da informação. Nova interação entre luz e átomos pode retornar a informação modificada (ou não) ao estado da luz para a transmissão desta por longas distâncias de forma mais rápida e eficiente possível. Além dos estudos dos fenômenos coerentes que permitem a manipulação com alto grau de precisão da interação entre luz e átomos e transferência da informação quântica, é preciso criar estados especiais da luz em que as propriedades quânticas estejam evidenciadas. Entre estes, podemos citar os estados comprimidos (squeezed states), em que temos uma redução da variância do ruído de uma dada quadratura de um 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, 4].

Após a produção destes estados, precisamos de meios adequados para averiguar as suas propriedades e comprovar que foram produzidos os estados esperados. Uma questão muito importante na óptica quântica é o processo de medida, uma vez que ao realizá-lo, por meio de medidas projetivas, perdemos parte da informação do estado, pois este colapsa para um dos autoestados da base na qual a medida foi realizada. Dessa forma, salvo casos muito particulares, é preciso realizar uma grande quantidade de medidas em cópias idênticas dos estado para se obter estatística suficiente para predizer qual o estado medido. Portanto, não podemos obter uma medida direta do estado, mas sim conhecê-lo indiretamente por meio de uma análise de dados obtida de inúmeras medidas. Essa reconstrução do estado é realizada através da Tomografia Quântica de Estados (QST – do inglês *Quantum State Tomography*): que consiste de um conjunto selecionado de observáveis cujas medidas fornece tomograficamente a informação completa do dado estado quântico [5]. Nas últimas décadas, tivemos um significativo aprimoramento nas tecnologias de medidas da luz, o que nos permite medir um conjuntos de observáveis suficientemente diverso para uma reconstrução confiável dos estados a partir dos dados mensurados.

Desse modo, este projeto se insere em um tópico importante na grande área de Informação Quântica, também é uma excelente oportunidade para o início da carreira científica de um estudante de graduação, na qual por meio de atividades de estudo e práticas realizadas no laboratório, irá propiciar uma sólida formação como jovem pesquisador. Neste ponto é importante ressaltar que o candidato à bolsa, é um estudante com desempenho de destaque na UFABC, apresentando um CR de 3,9 e um CP de 0,9, ou seja, com o BC&T quase finalizado e com diversas disciplinas fundamentais do bacharelado em física concluídas (curso em que também pretende se formar também), tais como mecânica quântica e as de eletromagnetismo. Diversas das disciplinas já cursadas no Bacharelado em física tem grande afinidade com o projeto aqui proposto. Portanto, é um estudante bastante adiantado no curso de física e que poderá se inteirar do tema de sua pesquisa de forma muito rápida e eficiente.

## 2 Objetivos e Metas

Este projeto está inserido no aprimoramento de nosso sistema experimental para a produção de estados comprimidos de polarização da luz. Atualmente, já produzimos estados comprimidos de polarização, porém o sistema de medida pode ser em muito melhorado e automatizado, o que é o tema prático deste projeto. Especificamente, o estudante terá um plano de estudos

condizente com seu conhecimento atual obtido por meio da graduação que realiza no BC&T e no Bacharelado em Física. Suas atividades de laboratório estarão diretamente relacionadas à montagem da interface de aquisição de dados por meio da programação no software comercial Labview. Esta nova interface permitirá adquirir as fotocorrentes dos detectores, converter para dados digitais, analisar os dados e realizar a reconstrução dos estados quânticos da luz produzidos em nosso laboratório de forma totalmente automática e muito mais rápida do que fazemos atualmente.

Este trabalho possibilitará ao estudante o contato com uma área de pesquisa bastante atual e que vem atraindo cada vez mais interesse, bem como permitirá a ele uma formação sólida em fundamentos de mecânica quântica e teoria da informação e, ao mesmo, tempo colocá-lo diretamente em contato com tecnologias sofisticadas no controle dos sistemas quânticos. Além disso, este trabalho é a uma das etapas necessárias para a consolidação de uma linha de pesquisa mais ampla atuando em protocolos de processamento e armazenamento de informação quântica em sistemas atômicos.

### 3 Metodologias

Este projeto se fundamenta no aprendizado por meio de dois eixos principais: atividades teóricas e atividades práticas, 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:

**Atividades Teóricas:** Inicialmente, a estudante terá uma lista de tópicos básicos envolvendo caracterização de estados quânticos por tomografia por meio da leitura de artigos científicos selecionados. Como dito anteriormente, por ser um aluno que já cursou boa parte das disciplinas básicas do Bacharelado em Física, ele já está apto para a leitura desta literatura sem dificuldades. Estes estudos também são complementados por discussões em nosso grupo e participação dos seminários que tem o papel estabelecer uma visão mais ampla e aprofundada da área, para além dos tópicos específicos do projeto.

**Atividades Práticas:** O estudante terá um papel importante na implementação do novo sistema de aquisição de dados. Assim, lidando com elementos ópticos, detectores e o sistema da *National Instruments*, que foi adquirido para fazer a interface computacional do aparato experimental. Tal sistema é altamente versátil, mas requer uma programação adequada, em geral, utilizando a linguagem *Labview*, o aluno atuará diretamente com este sistema e todas as adaptações necessárias para colocá-lo plenamente em funcionamento.

Obviamente, haverá equilíbrio entre as diversas atividades da iniciação científica com as disciplinas de graduação do BC&T e do Bacharelado em Física.. 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.

### 3.1 Estados Comprimidos de Polarização

Entre os métodos mais difundidos para produção de estados comprimidos da luz, temos os Osciladores Paramétricos Ópticos (OPO), que consistem do uso de conversão paramétrica descendente obtida em um cristal não linear com grande coeficiente  $\chi^2$ . Por meio desta técnica, obteve-se 12, 3dB de compressão no comprimento de onda de 1250nm, que é o atual recorde de compressão do ruído quântico [6]. Porém, estes aparatos requerem uma cavidade de alta qualidade e, em geral, um sistema eletrônico robusto para a estabilização ativa da cavidade e, conseqüentemente, produção estável dos feixes. Por isso, esse modo de produzir estados comprimidos costuma ser mais elaborado e ter um custo mais elevado para sua montagem. Outro ponto limitante desse processo ocorre devido à cavidade, que também atua como um filtro, por um lado auxilia a obter modos de saída muito próximos a modos TEM00, mas isso limita a possibilidade de se obter estados comprimidos multi-modo, cujo interesse atualmente tem aumentado bastante pelas suas possibilidades em esquemas de muitos canais para informação, bem como em produção de imagens quânticas.

Outro metodologia para obter a compressão de ruído é por meio do uso da não-linearidade de meios atômicos, como em células de vapor de metais alcalinos, por exemplo da técnica da mistura de quatro ondas, que também é um dos nossos interesses de nosso grupo. Nesta técnica, três feixes de luz com frequências convenientemente escolhidas interagem em uma célula de um gás de um metal alcalino com grande não-linearidade de terceira ordem, usualmente um isótopo de Rubídio, e devido à conservação de energia e momento e um novo feixe surge [7]; as características deste novo ente estão compartilhadas com as dos outros feixes, levando a compressão de ruído e emaranhamento entre algumas características do conjunto de feixes, tais como as quadraturas amplitude e fase.

Obviamente, a compressão de ruído pode ser observada não apenas em grandezas como a amplitude e fase do campo eletromagnético, mas também podemos obtê-la em outras variáveis do campo eletromagnético, como a polarização. Podemos definir a polarização [8] de uma onda eletromagnética como a direção de oscilação do campo elétrico associado a ela. É importante

menção que observar diretamente a evolução temporal deste campo elétrico não é possível, pois processos de foto-detecção ocorrem em taxas muito inferiores a frequência de oscilação da luz (em torno de  $10^{15}$  Hz para o espectro visível). Desta forma, o problema da mensurabilidade das propriedades de polarização permaneceu em aberto até as publicações de Stokes em 1852, nas quais ele abandona uma descrição “realista” da polarização em nome de grandezas observáveis: as intensidades das componentes na base de medição. Para se determinar a expressão para os parâmetros de Stokes [8], precisa-se fazer uma importante suposição: a quantidade passível de registro é uma média do efeito do campo elétrico rapidamente oscilante. Ao fazer isso, abandona-se uma descrição individual de cada componente do campo em favor de uma média estatística. Esta descrição clássica pode ser facilmente levada a uma versão quântica [9], na qual consideramos os operadores de criação e aniquilação e, dessa forma, podemos descrever a polarização de um estado por meio dos **operadores de Stokes**, que são definidos como:

$$\begin{aligned}\hat{S}_0 &= \hat{a}_x^\dagger \hat{a}_x + \hat{a}_y^\dagger \hat{a}_y = \hat{n}_x + \hat{n}_y; \\ \hat{S}_1 &= \hat{a}_x^\dagger \hat{a}_x - \hat{a}_y^\dagger \hat{a}_y = \hat{n}_x - \hat{n}_y; \\ \hat{S}_2 &= \hat{a}_x^\dagger \hat{a}_y + \hat{a}_y^\dagger \hat{a}_x; \\ \hat{S}_3 &= i(\hat{a}_y^\dagger \hat{a}_x - \hat{a}_x^\dagger \hat{a}_y).\end{aligned}\tag{1}$$

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 1(a).

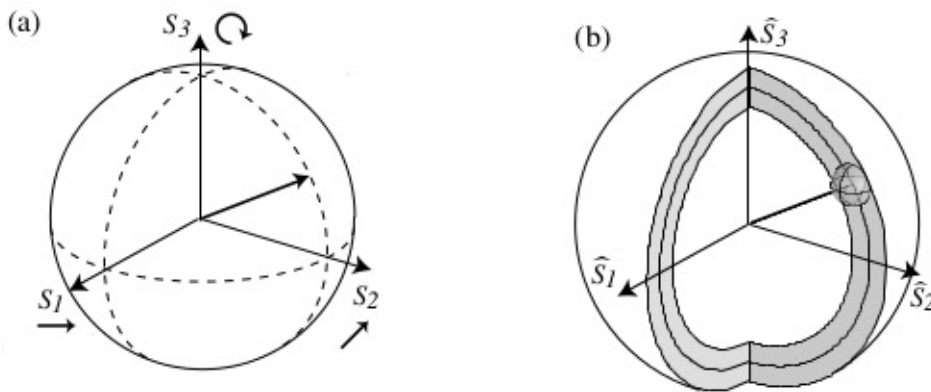


Figura 1: (a) Descrição clássica de parâmetros de Stokes na esfera de Poincaré e (b) descrição quântica dos operadores de Stokes com a representação das flutuações de um estado coerente de polarização [10]

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

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

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 1(b) para um estado coerente de polarização, onde o ponto central é dado por:

$$\hat{S}_1^2 + \hat{S}_2^2 + \hat{S}_3^2 = \hat{S}_0^2 + 2\hat{S}_0, \quad (3)$$

Não há apenas uma forma de definir compressão de ruído para estados de polarização [11], 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 [12] 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 2.

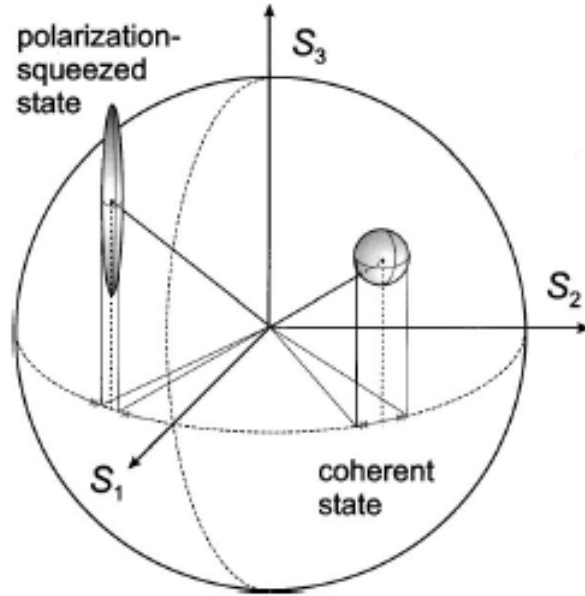


Figura 2: Representação de estados coerente e comprimido de polarização na esfera de Poincaré. Figura obtida de [10].

Como mencionado anteriormente, 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*) [13].



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 3

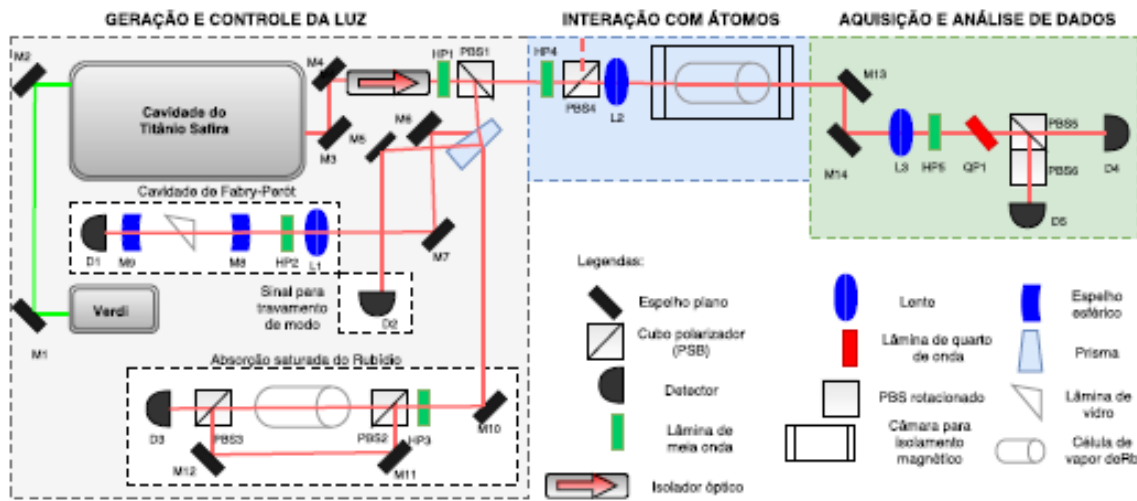


Figura 3: Esquema do aparato experimental para produção de estados de polarização comprimidos

Em nosso laboratório contamos com um laser Ti:Safira comercial (Coherent MBR EL) que é bombeado por um laser em 532 nm e 5 W (Coherent - Verdi G5); tal ferramenta nos fornece mais de 450 mW de luz numa região do infravermelho próximo. Incorporamos a este laser um sistema de estabilização ativa (montado em nosso laboratório), que nos permite realizar a sintonia fina do comprimento de onda do laser e ajustá-los as frequências correspondentes às transições atômicas do Rubídio. Neste aparato, poderemos verificar mais a fundo os limites da técnica de compressão de ruído por auto-rotação de polarização. A interação da luz com os átomos ocorre em células de vapor. Em nosso caso, utilizaremos Rubídio, que apresenta uma distribuição natural de 72% isótopo  $^{85}\text{Rb}$  e 28%  $^{87}\text{Rb}$ . Contudo, para a produção de estados comprimidos utilizamos uma célula que possui apenas o isótopo  $^{87}\text{Rb}$  e podemos produzir estados com compressão de ruído de até 5 dB [14].

### 3.2 Detecção homodina e estados de polarização da luz

Os estados quânticos de interesse costumam ter baixa intensidade, em geral, podemos mensurá-los considerando os valores médios e flutuações dos seus campos magnéticos. Um sistema de medida muito eficiente é a detecção homodina, que consiste no uso de um oscilador local, um separador de feixe e dois detectores para a determinação das características de nosso estado quântico de interesse. Essencialmente, temos um método interferométrico, no qual o feixe de interesse, vamos chamá-lo de  $|\alpha\rangle$  e um campo intenso, que vamos denominar de oscilador local (OL), ambos tem a mesma frequência e por isso é dado do nome de homodina caso fossem diferentes seria chamado de heterodina. Os feixes são encaminhados até um separador de feixes com fator de transmissão igual a 50%, ou seja, em média a metade de ambos os feixes são transmitidos e a outra metade é refletido, como podemos ver na Figura 4.

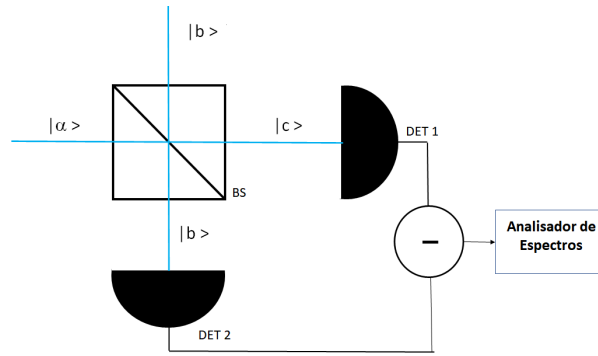


Figura 4: Representação de uma detecção homodina: O estado  $|\alpha\rangle$ , que atua como oscilador local (OL) e o estado de interesse  $|b\rangle$  interferem em um separador de feixe. Por fim,  $|c\rangle$  e  $|d\rangle$ , que são feixes formados pela interferência dos incidentes, são detectados e subtraídos, a fotocorrente resultante é enviada ao analisador de espectro.

Após a interferência, os fótons são convertidos em fotocorrente, a diferença destas fotocorrentes é enviada ao analisador de espectros. O processo pode ser descrito (em termos quânticos) da seguinte forma [10]:

$$\hat{n}_{cd} = \hat{c}^\dagger \hat{c} - \hat{d}^\dagger \hat{d} = -i(\hat{a}^\dagger \hat{b} - \hat{b}^\dagger \hat{a}) \quad (4)$$

Consideramos que o oscilador local é um estado coerente[12], assim temos:

$$\langle \hat{a} \rangle \rightarrow |\alpha| e^{i\theta} \quad (5)$$

O valor esperado do sinal medido é:

$$\langle \hat{n}_{cd} \rangle = -2|\alpha| \langle X \left( \theta + \frac{\pi}{2} \right) \rangle, \quad (6)$$

onde  $\hat{X}$  é dado por

$$\hat{X}(\theta) = \frac{1}{2}(\hat{b}e^{-i\theta} + \hat{b}^\dagger e^{i\theta}), \quad (7)$$

por fim a variância do sinal é dada por

$$\Delta^2 \hat{n}_{cd} = 4|\alpha|^2 \Delta^2 \hat{X}(\theta + \pi/2). \quad (8)$$

Para as medias dos parâmetros de Stokes, utilizamos um separador de feixe sensível a polarização da luz (*polarization beam splitter* ou PBS) e lâminas de onda  $\lambda/4$  (QWP) ou  $\lambda/2$  (HWP), dependendo da configuração [10]. Assim, temos as seguintes configurações:

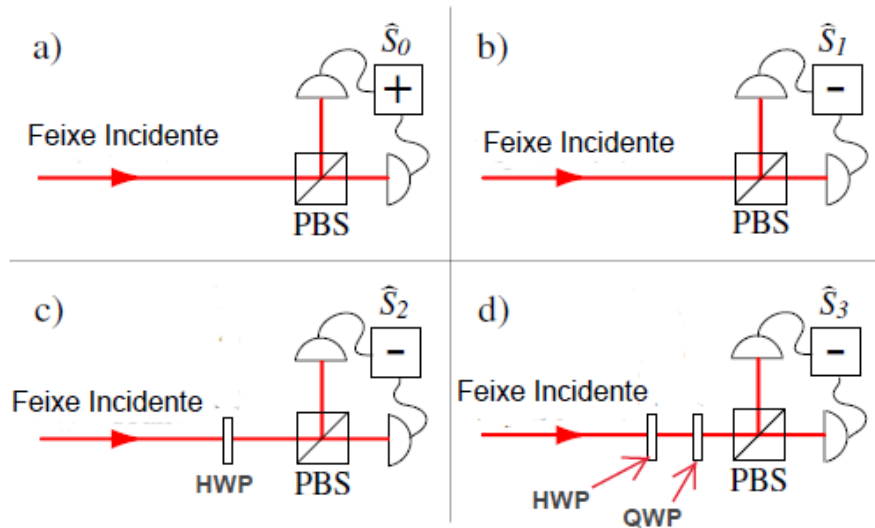


Figura 5: Esquema simplificado de detecção de estados quânticos: as quatro configurações de lâminas de onda para a medida dos parâmetros de Stokes (valores médios) e também suas flutuações.

Para esta etapa, temos o sistema de aquisição de dados da National Instruments<sup>1</sup> com a eletrônica necessária para a captura e conversão das fotocorrentes (analógico-digital). Por meio da programação em Labview, podemos obter as flutuações nos parâmetros de Stokes e determinar a compressão de ruído dos campos em tempo real. Este sistema também permite programar os protocolos para a realização de tomografia quântica dos estados produzidos em nosso aparato. Esta proposta de iniciação científica está fortemente vinculada à programação do sistema de aquisição de dados, como anteriormente mencionado.

Neste ponto é importante ressaltar que o desenvolvimento das técnicas de tomografia quântica para estados de polarização ainda é um tema em constante pesquisa e melhorias, sendo que neste projeto lidaremos com esta questão não apenas do ponto de vista experimental, mas também teórica, apresentaremos as diferentes formulações do problema ao estudante e implementaremos as mais adequadas ao nosso aparato experimental para testes comparativos.

<sup>1</sup>A interface de aquisição de dados foi adquirida da empresa National Instruments (<http://www.ni.com/pt-br.html>), que também fornece o suporte técnico e o atendimento em relação ao software Labview

Apresentamos, de forma geral, os principais elementos para realização do projeto de pesquisa, que envolve processos de caracterização de estados por meio de tomografia quântica. O aluno atuará nestes estudos tanto do ponto de vista teórico quanto experimental.

## **4 Viabilidade de execução**

Como já mencionado, o estudante já está bem avançado tanto no curso BC&T quanto no Bacharelado em Física, dessa forma, ele tem uma básica sólida de física básica que permitirá o desenvolvimento adequado dos estudos sobre caracterização de estados quânticos e tomografia quântica. Quanto a parte experimental, contamos com todos os elementos ópticos e equipamentos necessários para as montagens do sistema de medida e da interface digital que foram mencionadas. Dessa forma, não faltarão recursos para a execução do projeto e confiamos que por meio do trabalho do estudante alcançaremos as metas e objetivos descritos neste projeto.

## **5 Plano de Trabalho e Cronograma**

O cronograma deste projeto de pesquisa pode ser dividido em três partes principais: atividades teóricas por meio de um plano de estudos e as praticas desenvolvidas no laboratório: Inicialmente, o aluno fará um trabalho de pesquisa bibliográfica sobre os resultados experimentais mais relevantes nos tópicos específicos de sua pesquisa associados ao conhecimentos de física, matemática e programação para atuar diante das questões do projeto. e também irá adquirir os conhecimentos básicos de física, matemática e programação para uma compreensão adequada do problema em questão. Ressaltamos que para a realização de um bom trabalho experimental é sempre fundamental um contato profundo com a parte teórica que aborda o problema. Os conhecimentos do estudante adquiridos em suas disciplinas de graduação serão o ponto de partida para lidar de maneira confortável com os requisitos necessários para a programação e a montagem dos aparatos experimentais para a caracterização dos estados quânticos.

Em termos de quadrimestres, para o primeiro teremos a revisão bibliográfica sobre estados comprimidos de polarização e sua caracterização por meio de tomografia quântica e também estudos de tutoriais sobre programação em ambiente Labview e do sistema de aquisição de dados da National Instruments existente em nosso laboratório.

No segundo quadrimestre, montagem de aparato experimental para medidas de estados comprimidos de polarização dos diferentes operadores de Stokes e a caracterização destes sistemas.

Para o terceiro quadrimestre, partiremos para o desenvolvimento dos programas para a realização automática de Tomografia Quântica dos estados e melhorias do sistema de aquisição. Neste quadrimestre, o aluno também participará do simpósio de Iniciação Científica da UFABC

e apresentação dos resultados do projeto.

Por fim, ressaltamos que este projeto permitirá o contato do estudante com tópicos de pesquisa muito atuais, enquanto ele avança em sua formação como pesquisador em um ambiente científico bastante estimulante que é o nosso grupo de pesquisa, 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] E. S. Polzi K. Hammerer, A. S. Sorensen. Quantum interface between light and atomic ensemble. *Review Modern Physics*, 82:1041, 2010.
- [3] A.B. Matsko et.al. Vacuum squeezing in atomic media via self-rotation. *Phys. Rev. A*, 66:043815, 2002.
- [4] M.T.L. Hsu et.al. Effect of atomic noise on optical squeezing via polarization self-rotation in a thermal vapor cell. *Phys. Rev. A*, 73:023806, 2006.
- [5] M. G. Raymer A.I. Lvovsky. Continuous-variable optical quantum-state tomography. *Review Modern Physics*, 81:299, 2009.
- [6] M. Mehmet et al. "squeezed light at 1550 nm with a quantum noise reduction of 12.3 db". *Optics Express*, 19:25763, 2011.
- [7] B.Vincent et al. "entangled images from four-wave mixing". *Science*, 321:544, 2008.
- [8] Dennis H Goldstein. *Polarized light*. CRC press, 2016.
- [9] A. S. Chirkin. Polarization-squeezed light and quantum degree of polarization (a review). *Optics and Spectroscopy*, 119:397, 2015.
- [10] Hans-Albert Bachor and Timothy C Ralph. *A guide to experiments in quantum optics*. Wiley, 2004.
- [11] A. Luis and N. Korolkova. Polarization squeezing and nonclassical properties of light. *Physical Review A*, 74:043817, 2006.
- [12] Peter L. Knight Christopher C. Gerry. *Introductory Quantum Optics*. Cambridge University Press, 2004.

- [13] 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.
- [14] Thiago H. D. Santos. Geração de estados da luz com compressão de ruído nos operadores de stokes. *UFABC*, 2018.