

6. Conclusão

Ao longo dos dois anos de trabalhos experimentais realizados no grupo de física aplicada da universidade de Genebra, dois projetos de contagem de fótons usando conversão não-linear de frequências foram concluídos e renderam importantes resultados.

O primeiro deles, em ordem cronológica, consistiu em uma tentativa de realização experimental de um sistema de criptografia quântica de espaço livre utilizando um comprimento de onda no infravermelho médio. A motivação para realização do projeto veio do fato de que, segundo resultados recentemente publicados, a faixa de comprimentos de onda que se estende entre 3 e 20 μm é menos suscetível a diversos efeitos deletérios causados pela atmosfera, tais como atenuação e turbulência. Além disso, a proximidade entre a universidade de Genebra e a empresa Alpes Lasers, fabricante dos chamados *quantum cascade lasers*, através da universidade de Neuchâtel, facilitou o pontapé inicial ao projeto.

Inicialmente, o estágio de detecção, que é o mais crítico para o sucesso do sistema, foi desenvolvido e, pela primeira vez, avaliou-se o desempenho de um contador de fótons que opera a 4.65 μm . Foi constatado que, com o emprego de um laser de bombeio a 980 nm, um cristal não-linear adequado – AGS (tiogalato de prata) ou PPLN (niobato de lítio periodicamente polarizado), ambos capazes de realizar o casamento de fase necessário – e um fotodiodo avalanche de silício, é possível obter um detector extremamente sensível e de alta resolução temporal. Com apenas 63 mW de potência de bombeio, que no experimento era limitada pelas perdas nos componentes ópticos, foi obtido um detector sensível a 1.24 pW de potência, um valor duas ordens de grandeza inferior aos detectores mais sensíveis que estão comercialmente disponíveis, com a vantagem de não necessitar de resfriamento com nitrogênio líquido.

O sucesso do experimento nos permitiu realizar uma simulação de troca de chaves, realizada dentro do laboratório, para avaliação da taxa de erro de qubit (QBER) que seria obtida com o uso do protótipo. O requerimento mais crucial, que era a produção e detecção de pulsos de curta duração (da ordem de 1 nanossegundo), foi satisfeito; desta forma, mostramos que a QBER encontrava-se

dentro dos limites necessários para a segurança da informação. No entanto, a baixíssima eficiência de detecção, fruto da baixa potência de bombeio, não permitiria que o detector pudesse ser imediatamente aplicado a um sistema de criptografia quântica. Seria necessário, inicialmente, que melhorias fossem implementadas, e a atenção foi momentaneamente levada para fora do laboratório para que um estudo teórico pudesse ser realizado.

À medida que os estudos teóricos foram sendo desenvolvidos, constatou-se que, apesar das excelentes características de transmissão, a janela de frequências no infravermelho médio sofria uma séria limitação de desempenho devido ao ruído térmico de fundo. Esse ruído, proveniente da radiação de corpo negro de quaisquer objetos em equilíbrio térmico com o ambiente, aumenta consideravelmente com o comprimento de onda, de forma que, a $10\text{ }\mu\text{m}$, já atinge-se um limite no qual a relação sinal-ruído, no contexto de comunicações quânticas, é excessivamente alta. Esse resultado permitiu concluirmos que nem todos os comprimentos de onda no infravermelho médio são adequados a sistemas que utilizam contagem de fótons. No entanto, foi demonstrado que, sob certas condições atmosféricas, que envolvem um tipo específico de névoa normalmente presente em áreas geográficas com abundância de lagos ou lagoas, o comprimento de onda de $4.65\text{ }\mu\text{m}$ permite a instalação de um sistema de comunicações quânticas extremamente robusto e de desempenho amplamente superior a qualquer sistema que opere em comprimentos de onda usuais no infravermelho próximo. Para que o sistema seja viável, todavia, é necessário utilizar um sistema ressonante, no qual o processo não-linear é amplificado no interior de uma cavidade, de forma que a potência de bombeio seja suficientemente alta.

Nesse momento, surgiu a semente do segundo projeto: realizar um sistema de conversão de frequências intra-cavidade, não para o infravermelho médio mas para o famoso comprimento de onda de $1.55\text{ }\mu\text{m}$, amplamente utilizado nos sistemas de comunicações via fibras ópticas. A idéia consistia na utilização de uma mesma cavidade para gerar os sinais de bombeio e de soma de frequências ao mesmo tempo, da mesma forma que alguns lasers são construídos. A importância de sistemas rápidos, eficientes e de baixo ruído a $1.55\text{ }\mu\text{m}$ é inquestionável, e esse projeto foi criado com o objetivo específico de tentar obtermos níveis de ruído inferiores aos observados em outros projetos que utilizam guias de onda no

estágio de conversão de frequências, mas ao mesmo tempo mantendo a mesma eficiência de conversão.

A notícia de que um grupo de pesquisas na China tinha acabado de publicar resultados experimentais com um sistema praticamente idêntico ao que estávamos desenvolvendo nos levou a um caminho um pouco diferente: experimentar o uso de cristais não-lineares menos eficientes, mas que poderiam, de alguma forma, exibir uma menor relação sinal-ruído. Após a constatação de que o próprio cristal laser atuava como uma fonte de ruído extremamente importante, foi desenvolvida uma cavidade em formato de “L” que é capaz de filtrar todo o ruído que não seja intrínseco ao processo de soma de frequências.

O resultado final mostrou que a relação sinal-ruído do detector intracavidade era duas vezes superior à obtida pelo grupo chinês, mesmo com uma potência de bombeio 10 vezes maior, que gera uma série de efeitos indesejados. Entretanto, devido à dificuldade em se obter boas eficiências de conversão, o uso de cristais com casamento de fase birrefringente não é muito adequado em aplicações finais de sistemas de comunicações. Fica aqui uma sugestão, por exemplo, de aplicar o conhecimento desenvolvido como parte de uma técnica de avaliação do ruído intrínseco de cada material não-linear.