

UNICAMP

PRODUÇÃO DE PULSOS DE RAIOS-X ULTRA-CURTOS ATRAVÉS DE LASERS AMPLIFICADOS DE FEMTOSEGUNDO

Relatório Parcial – Iniciação Científica

Aluno:

Rafael Ferreira da Costa Vescovi



Orientador:

Carlos Manuel Giles Antunez de Mayolo



1. Introdução

O desenvolvimento de lasers de alta potência para produção de pulsos de femtosegundo está permitindo o avanço científico em inúmeras áreas de pesquisa como a física dos raios-X ultra-rápidos. De fato, lasers de alta potência table-top estão sendo utilizados para a produção de pulsos de raios-X com largura temporal de femtosegundos. Estas fontes produzem radiações com comprimento de onda muito curto por vários mecanismos diferentes, entre os quais podemos citar a geração de fontes coerentes de VUV (Ultra-Violeta de Vácuo) pela geração de altos harmônicos (High Harmonic Generation), a geração de raios-X duros monocromáticos e a geração de raios-X duros com espectro contínuo [1-4]. Os raios-X produzidos desta forma possuem características inéditas, entre as quais podemos citar a duração do pulso, o tamanho reduzido e alto brilho da fonte.

Todos estes avanços estão marcando uma aproximação de duas comunidades científicas usualmente distantes: a comunidade de lasers de alta potência e a comunidade de óptica de raios-X. Esta aproximação já pode ser vista em duas áreas de aplicações dos lasers pulsados de alta potência. Por um lado, está a produção de pulsos ultracurtos de raios-X como já citado, por outro, utilizam-se lasers pulsados de femtosegundos para excitar processos ultra-rápidos que são acompanhados por experimentos de difração de raios-X, utilizando-se a natureza pulsada das fontes de luz síncrotron. Desta forma pode-se obter informação espacial com resolução atômica similares aos experimentos de Zewail por difração de elétrons, que lhe valeram o prêmio Nobel em 2005 [5].

A vantagem da produção de pulsos ultracurtos de raios-X a partir dos lasers de alta potência reside no fato de que nas fontes de luz síncrotron só se conseguem pulsos de raios-X com larguras temporais de várias dezenas de picosegundos, enquanto nas fontes de raios-X table-top esta largura pode chegar abaixo de 30 femtosegundos, abrindo o caminho para o estudo de fenômenos ultra-rápidos com resolução atômica. O potencial de uso dos raios-X produzidos através de lasers vai desde o estudo fundamental de reações químicas na escala de dezenas de femtosegundos, o estudo de estados transientes da matéria fora do equilíbrio termodinâmico, como as transições de fase, até a dinâmica de proteínas na área biológica, abrindo grandes avenidas de progresso em áreas fundamentais da ciência. O nosso grupo de pesquisa do IFGW está projetando o desenvolvimento de fontes de raios-X pulsados utilizando lasers de alta potência em colaboração com membros do CEPOF-FAPESP. Recentemente lasers amplificados de femtosegundo foram instalados no Departamento de Eletrônica Quântica do IFGW permitindo-nos realizar os testes

iniciais. Também mantemos colaboração com o Centro de Lasers e Aplicações do IPEN em São Paulo onde existe um laser de TW sendo desenvolvido e operado para inúmeras aplicações.

Um projeto temático se encontra em elaboração neste sentido e deve resultar na produção de raios-X duros com pulsos de femtosegundos pela primeira vez em nosso país. Este projeto está sendo realizado pelo nosso grupo de pesquisa do IFGW envolvendo alunos de mestrado e iniciação científica [6-8]. A idéia principal deste projeto é o estudo da teoria e experimentos envolvendo raios-X e lasers pulsados de alta potencia. Também vamos estudar se possível a viabilidade de focalizar um feixe pulsado de femtosegundo de alta potência de maneira a alcançar uma intensidade limiar de 10^{16} W/cm² capaz de permitir a produção de pulsos de raios-x com larguras de centenas de femtosegundos. Experimentos deste tipo já foram realizados em vários laboratórios no exterior e este projeto visa viabilizar este tipo de fonte em nosso instituto.

2. Proposta Inicial

Este projeto de pesquisa teve como objetivo o estudo da produção de pulsos de raios-X ultra-curtos através do uso de lasers pulsados de alta potência para experimentos em física da matéria condensada e a viabilidade da construção de um desses sistemas no LCARX (Laboratório de Cristalografia Aplicada a Raios-X).

A geração de raios-X usando lasers de femtosegundo de altíssima potência está inserida em um projeto de colaboração com pesquisadores da área de lasers do IFGW-UNICAMP e do CLA-IPEN, assim como com pesquisadores do Institut für Optik und Quantenelektronik da Universidade Friedrich-Schiller em Jena (Alemanha). Esse projeto de iniciação científica tem como objetivo introduzir o aluno às técnicas de focalização de lasers pulsados de femtosegundo assim como à instrumentação necessária para a produção de raios-X por plasma laser.

3. Tarefas Realizadas

Esta seção será dividida entre os tópicos propostos pelo projeto de pesquisa apresentado pelo aluno. Vale salientar que vários dos estudos são bastante mais profundos do que o apresentado nesse relatório, de modo que esse é somente um relato.

3.1. Estudo sobre Raios-X

Os raios-X são uma parte do espectro eletromagnético que vai de 10 a 0,01 nanômetros, que correspondem a frequências de 30 petaHertz ($\sim 10^{16}$) a 30 exaHertz ($\sim 10^{19}$) e energias na faixa de 120 eV a 120 keV. Em muitos livros e referências os raios-X ainda são chamados de radiação de Röntgen, uma homenagem a Wilhelm Conrad Röntgen, que deu o nome de raios-X para a radiação “desconhecida” que ele descobriu.

Raios-X de 0,12 a 12 keV são chamados de raios-X mole e de 12 a 120 keV são chamados de raios-X duro, de acordo com sua capacidade de penetração. Vale ressaltar que a energia de um fóton de raios-X é limitada pela energia do elétron que o gerou no tubo, portanto um tubo de 100keV nunca vai gerar fótons com mais de 100 keV.

Os raios-X são gerados então usualmente por dois processos, chamados de Fluorescência e Bremsstrahlung. O primeiro é um processo quântico onde o elétron incidente tem energia suficiente para tirar um elétron de caroço do alvo e gerar uma vacância. O preenchimento dessa vacância gera um fóton com energia de raios-X. O processo de fluorescência gera apenas radiação nos decaimentos possíveis de vacâncias, portanto gera um espectro muito particular do alvo, que muitas vezes é chamado de linhas espectrais características do elemento químico. O outro tipo de radiação citado, é o processo de freiamento dos elétrons quando são espalhados pelo forte campo elétrico na vizinhança de átomos pesados. Essa radiação é gerada a partir de um processo clássico e, portanto tem um espectro contínuo. Vale salientar que não é apenas a vizinhança de um átomo pesado que gera um forte campo magnético, portanto é possível obter esse freiamento de maneira artificial por magnetos muito poderosos que serão apresentados na seção 3.2

3.1.1. Cristalografia de Raios-X

Cristalografia de raios-X é um método de determinar o arranjo atômico em um cristal utilizando raios-X. Quando incidimos um feixe de raios-X em um cristal com arranjo atômico bem definido, temos feixes espalhados e analisando o ângulo entre o feixe inicial e os feixes espalhados podemos tirar informações sobre a distância entre os átomos, a população das células unitárias e até o tipo de ligação química que estão associados.

A cristalografia de raios-X tem sido fundamental em muitas áreas da ciência, principalmente nas áreas onde podemos formar cristais com os objetos de estudo (curiosamente uma das áreas mais frutíferas da cristalografia é a biologia, onde o estudo de cristais de proteínas trouxe inúmeras descobertas para a ciência e continua trazendo todos os dias)

Os cristais estudados podem ser monocristais, quando existe apenas uma orientação para todas as células unitárias em seu volume, ou policristais, que são formados por inúmeros grãos cristalinos menores que são randomicamente ordenados em seu volume. Essa classificação é importante pois a ordem dos cristais influi diretamente em como os raios-X vão ser espalhados pela amostra. No primeiro caso, o raio-X incidente só vai ser refratado em ângulos bastante específicos, esse método é chamado de difração de monocristais. No caso da difração de policristais, como temos os grãos cristalinos randomicamente distribuídos, algum deles vai sempre satisfazer a condição de difração e portanto nosso resultado serão cones ao invés de spots específicos.

3.2. Estudo sobre fontes de Raios-X pulsadas

Nesta seção mostraremos as principais fontes de raios X pulsados existentes atualmente e as propostas para desenvolvimento. Essas fontes podem ser divididas em duas grandes classes baseadas em seu tamanho, as de grande porte, como síncrotrons de terceira e quarta geração e, as fontes de pequeno porte, desenvolvidas recentemente, denominadas de fontes *table-top*. Dentre as fontes *table-top* podemos citar a geração de VUV através de harmônicos de alta ordem (HHG), fontes $K\alpha$ e fontes bétatron de raios-X, que serão descritos citadas neste relatório. Outras fontes que serão descritas são os síncrotrons de terceira geração e lasers de elétrons livres (*Free Electron Lasers* – FEL), também denominados síncrotrons de quarta geração.

3.2.1. Síncrotron de terceira geração

A radiação síncrotron é gerada através da deflexão de partículas carregadas com velocidades próximas da velocidade da luz (atingindo energias no intervalo de 1 a 5 GeV) por meio de campos magnéticos. Qualitativamente falando, as linhas de campo elétrico geradas por essas cargas relativísticas sofrem distorções quando ela é acelerada levando a formações emissão de radiação eletromagnética. O espectro da radiação produzida por esta fonte vai do infravermelho (10 μ m) até aos raios X duros (0,1Å). Síncrotrons de 2ª geração surgiram entre os anos de 1970 e começo de 1990 e foram consideradas as

primeiras máquinas dedicadas à geração de radiação através da deflexão de partículas carregadas por meio de dipolos magnéticos, denominados de *bending magnets*, instalados nas seções circulares do anel de estocagem. Ao final da década de 90 surgiram os síncrotrons com capacidades de produzir fótons de intensidades superiores aos produzidos por um síncrotron de 2ª geração, denominados síncrotrons de 3ª geração. Neste caso, os dipolos magnéticos são utilizados apenas para manter as partículas em uma órbita circular, com energias de 6-8 GeV, e dispositivos, denominados wigglers e onduladores, são inseridos nas seções retas do anel de armazenamento.

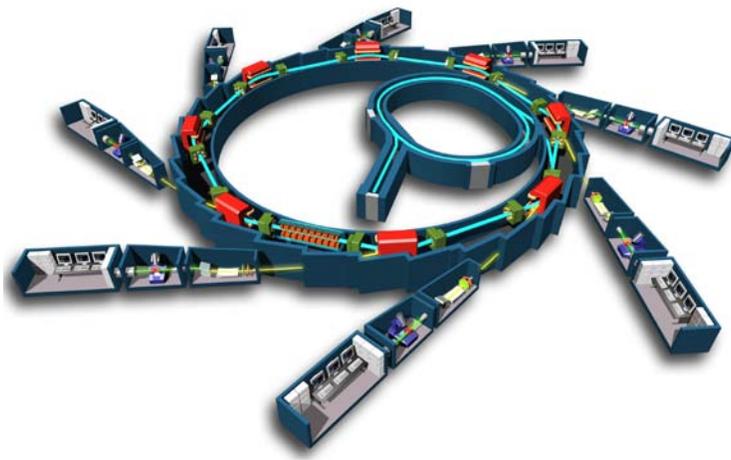


Figura 1 - Esquema de funcionamento de um Síncrotron. Em azul temos o percurso do nosso pacote de elétrons, em amarelo temos os feixes de luz produzidos que vão para as cabanas de experimentos. No caminho do pacote podemos ver em vermelho os magnetos e onduladores, e em verde os instrumentos de ótica para controle dos pacotes.

As características únicas da radiação produzida por uma fonte de luz síncrotron residem na capacidade de obter um espectro eletromagnético amplo com intensidades da ordem de um bilhão de vezes maior que a radiação obtida por tubos de raios X convencionais; os feixes produzidos são finos e a divergência é baixa (alta colimação) e pulsos de luz da ordem de 10 a 100 picosegundos são produzidos, abrindo grandes avenidas para estudos com resoluções temporais.

3.2.2 Lasers de Elétrons Livres (FELs)

Os lasers de elétrons livres são o que há de mais moderno e promissor dentre as fontes de raios X ultra-rápidos com alto brilho em desenvolvimento nos últimos anos. A grande motivação de estudos no desenvolvimento desta nova fonte, que também é denominada como síncrotron de 4ª geração, segue do fato desta conter propriedades únicas como alto controle dos parâmetros do feixe produzido, alta coerência (transversal e longitudinal), alta potência e duração temporal que pode chegar a menos de 10fs que permitem a investigação de processos da natureza com grande resolução temporal. A grande peculiaridade dos FEL's é que seu meio ativo não é constituído por átomos ou moléculas. Como seu próprio nome sugere, a radiação produzida por estas fontes é proveniente de feixes de elétrons livres que são acelerados com velocidades próximas à velocidade da luz (correspondendo à energias no intervalo 17-20GeV) e

introduzidos em um ondulador (que consiste de um arranjo periódico de magnetos com distancias e campo variáveis de acordo com a radiação que deseja se produzir). Nestes arranjos periódicos os elétrons estão sob a força de Lorentz, executando oscilações transversais. Os elétrons então começam a interagir coerentemente entre si sentindo os campos elétricos produzidos por outros elétrons. A interação com o campo elétrico é espacialmente modulada a um período igual ao comprimento de onda dos raios X e os elétrons passam a realizar a trajetória em pequenos pacotes denominados de *microbunching*. Este mecanismo é denominado de *Self Amplified Stimulated Emission*, ou SASE, e a radiação emitida através deste mecanismo é muito mais intensa uma vez que a radiação emitida por cada pacote de elétrons reforça a radiação emitida por outros pacotes.

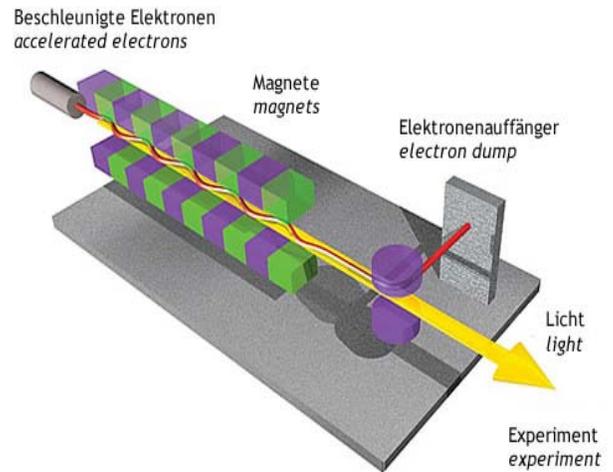


Figura 2 - Ilustração da montagem e funcionamento de um FEL

3.2.3 Produção de Harmônicos de Alta Ordem (HHG)

Harmônicos de altas ordens são formados por interações não-lineares que ocorrem quando um intenso pulso de laser é focalizado sobre um gás. A compreensão do mecanismo de produção dos altos harmônicos é dada por um modelo semi-clássico denominado de 'modelo de três passos' (*three step model*) que é ilustrado na figura 3.

O primeiro passo deste modelo corresponde à ionização dos átomos presentes no gás; este processo ocorre através de uma distorção do potencial coulombiano do átomo causada pelo forte campo elétrico dos pulsos de laser. O segundo passo corresponde à aceleração dos elétrons livres até um determinado ponto e, após a

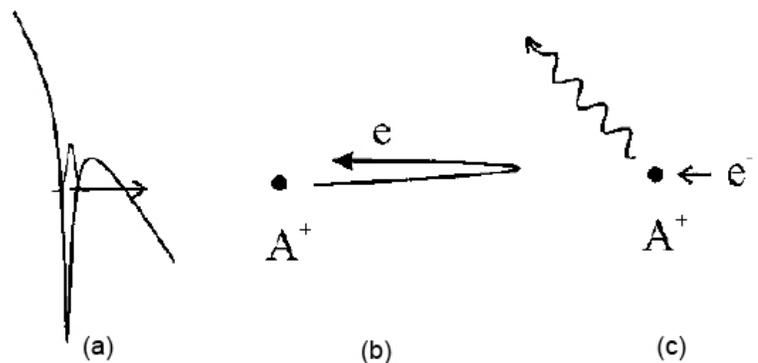


Figura 3 - Modelo de três passos: a) Ionização; b) Aceleração através do campo elétrico produzido pelo pulso de laser; c) Recombinação com emissão de raios-X

inversão do campo elétrico do pulso, esses elétrons passam a ser acelerados em direção ao átomo. O terceiro e último passo consiste na recombinação do elétron ao átomo. Dessa forma, pulsos no extremo ultravioleta e raios X moles são gerados com durações temporais curtíssimas e baixa divergência.

3.2.4 Fontes $K\alpha$

A geração de raios X através desta fonte baseia-se na interação de um pulso extremamente intenso com um alvo sólido. Neste caso a energia dos pulsos de laser é absorvida pelo material e devido à sua grande intensidade, elétrons do material são arrancados formando um intenso plasma térmico de aproximadamente 300eV. Os elétrons altamente energéticos presentes neste plasma são então acelerados contra o alvo sólido, ionizando as camadas mais internas dos átomos, produzindo radiação por *bremstrahlung* e raios X característicos K . Os raios X produzidos por estas fontes possuem propriedades únicas como largura temporal da ordem de femtosegundos, largura espacial da ordem de micrometros, alto brilho e emissão isotrópica em 4π radianos.

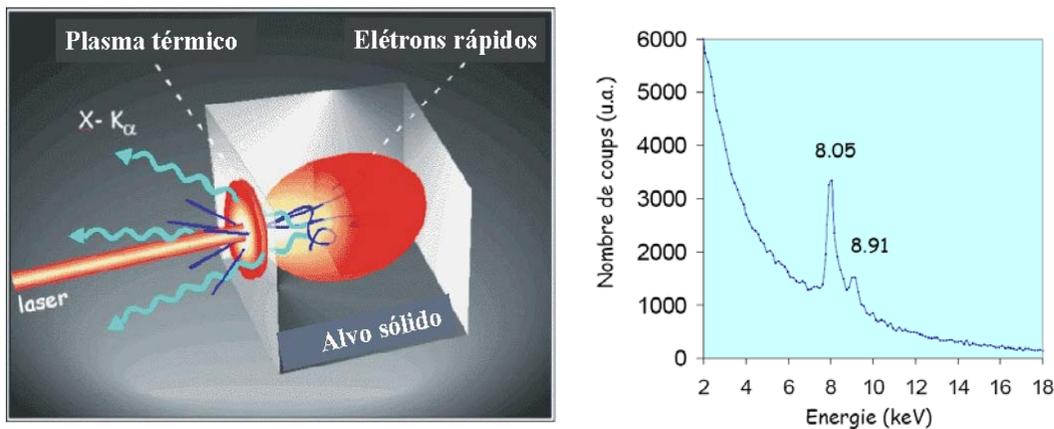


Figura 4: Esquema de produção de raios X por fontes plasma lasers e espectro de emissão das raias características $K\alpha$ e $K\beta$ para um alvo de cobre.

3.2.5 Fontes Bétatron de raios X

O mecanismo de produção de raios X pulsados através desta fonte consiste em forçar os elétrons a realizarem oscilações bétatron em um campo elétrico extremamente forte. A partir da incidência de um pulso de laser de alta potência sobre um jato de gás, um plasma altamente energético é formado, criando

regiões com excesso de cargas positivas e negativas. Com isso, uma onda é formada e se propaga dentro da cavidade formada a velocidades próximas a velocidade da luz. Um forte campo elétrico é gerado na direção das cargas positivas para as cargas negativas; quando são atraídos pelos íons os elétrons passam pelo eixo de propagação dos pulsos de laser e interagem com estes provocando um movimento oscilatório. A fonte bétatron produz pulsos de raios X extremamente intensos e colimados, com brilhância da ordem de 2×10^{22} fótons/s/mm²/mrad/0.1% BW (largura de banda) para uma fonte de 20x20µm de área.

3.3. Práticas experimentais com Raios-X

Nesta seção vão ser apresentados e discutidos os experimentos envolvendo raios-X que o aluno esteve presente durante este projeto, como alguns deles são muito complicados por si só, a discussão será apenas superficial. Os experimentos básicos de difração de raios-X foram realizados no Laboratório de Cristalografia Assistida por Raios-X do IFGW,



Figura 5 - Vista panorâmica do anel de estocagem do LNLS (Laboratório Nacional de Luz Sincróton).

UNICAMP. Os experimentos de sincrotron, com exceção do experimento realizado no KEK que se localiza em Tsukuba no Japão, foram realizados utilizando a linha de luz XRD2 do Laboratório Nacional de Luz Sincróton.

3.3.1. Experimento INVAR-KEK

Durante o mês de fevereiro de 2010, o aluno participou da realização de um experimento tipo “Pump and Probe” no KEK, sincrotron de Tsukuba no Japão. O objetivo do experimento era estudar a variação dos parâmetros de rede em tempos ultra-curtos para essa liga de Fe₆₄Ni₃₆ conhecida como INVAR.

Para realização do experimento foi escolhida a linha de luz NW14, uma linha de Pump and Probe do Photon Factory Advanced Ring. Essa linha é bastante especial para a realização deste tipo de experimento primeiramente por que o PF-AR funciona todo o tempo em modo de Single-Bunch (com apenas um pacote de elétrons no anel) o que leva a uma menor frequência de pulsos e uma maior intensidade entre cada pulso. Esta linha ainda está equipada com um chopper, que é utilizado para escolher quais pulsos do anel vão atingir a amostra, diminuindo ainda mais a frequência de pulsos.

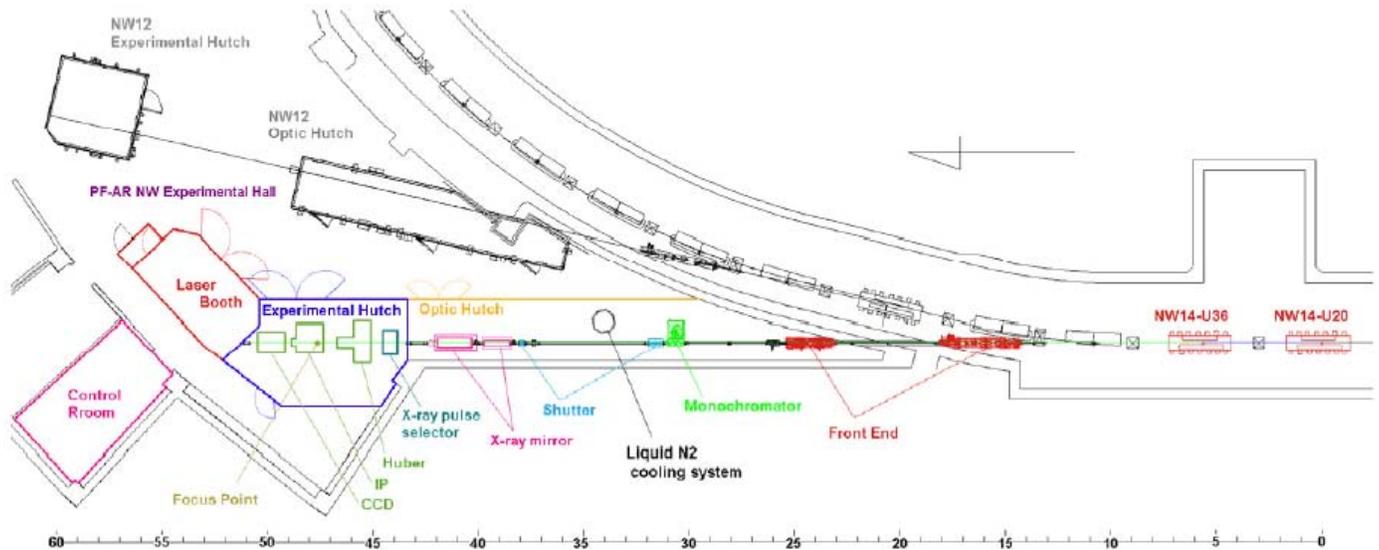


Figura 6 – Esquema da linha de luz NW14.

Com uma frequência de pulsos tão reduzida, é possível então sincronizar a chegada dos pulsos de raios-X do anel com um laser pulsado de infravermelho. Deste modo podemos excitar a amostra e medir a amostra excitada.

Feita a sincronização então podemos gerar um atraso entre a excitação e a chegada do pulso de raios-X e tirar uma medida para cada tempo de atraso, deste modo então temos uma medida de uma amostra excitada resolvida no tempo.

3.4. Estudo sobre a produção de Raios-X por fonte de plasma.

Como estudado na seção 3.2 vimos que a produção de raios-X em tubos convencionais ocorre devido à radiação de freamento (Bremsstrahlung) e emissão de raios características (fluorescência), quando elétrons acelerados se chocam contra um alvo sólido. Também são produzidos raios-X em aceleradores

síncrotron quando elétrons relativísticos passam por campos magnéticos desviando sua trajetória. Há menos de 10 anos atrás, têm-se produzido raios-X através do uso de lasers pulsados de alta potência.

Este desenvolvimento está sendo realizado estudando-se a interação de pulsos ultracurtos de IR em gases e sólidos. Vários mecanismos foram descobertos diferenciando-se pela emissão de raios-X coerentes ou incoerentes, assim como pela produção de um espectro com raios características ou por um espectro contínuo.

As fontes de raios-X coerentes se baseiam na interação do pulso laser com um gás formando um plasma onde se criam harmônicos de ordem muito alta em um processo não linear, hoje denominado de High Harmonic Generation (HHG). Neste processo um elétron arrancado de um átomo do gás recebe energia cinética do campo elétrico do pulso laser e volta a se recombinar gerando a produção de um feixe luminoso com energia muitas vezes maior que o fundamental. Atualmente conseguem-se harmônicos de ordens tão altas quanto 30 a 40 gerando pulsos no ultra-violeta de vácuo muito próximos dos raios-X moles (comprimentos de onda da ordem de dezenas de nanômetros). As características principais deste pulso é que ele é direcional e mantém as propriedades de coerência do feixe incidente. A desvantagem é que ainda não se alcançaram harmônicos que cheguem a comprimentos de onda na faixa dos raios-X duros e sua utilização envolve técnicas de ultra alto vácuo.

Em 1994, descobriu-se outro princípio para produção de raios-X por pulsos ultracurtos de lasers mais tarde denominado de fonte K-alfa de raios-X . Neste processo o pulso laser incide em um alvo sólido em um ambiente de vácuo permitindo, desta vez, que um plasma seja criado na incidência do pulso laser com a superfície do sólido. Desta forma elétrons arrancados dos átomos do sólido adquirem suficiente energia cinética para colidir com o alvo sólido, reproduzindo o mesmo processo que aquele existente em tubos de raios-X convencionais (com raios-X característicos acompanhados de Bremsstrahlung), sendo que neste caso o feixe de raios-X é produzido apenas durante o intervalo de tempo correspondente à largura do pulso e o tamanho do alvo de raios-X é definido pelo tamanho do ponto focal do laser no sólido. Desta forma, demonstrou-se que ao focalizar adequadamente o pulso luminoso e alcançar uma intensidade de pico superior a 10^{16} W/cm² atingia-se o limiar para a produção de raios-X. Este tipo de fonte foi denominada na comunidade científica como fonte “plasma-laser” ou fonte K-alfa, pois os raios-X são produzidos por fluorescência emitindo raios características (K-alfa e K-beta) de forma isotrópica em 4 π radianos.

Muito recentemente foi identificado um novo processo para a produção de raios- X por meio dos lasers pulsados muito similar ao que ocorre nas fontes de luz síncrotron, produzindo um espectro contínuo de raios-X (branco) e um feixe colimado. Neste caso utiliza-se novamente a interação do laser com um jato

de gás e demonstra-se que os elétrons acelerados no plasma passavam pelo processo de oscilações periódicas com o período do comprimento de onda do laser e emitindo raios-X de maneira similar àquela que ocorre dentro de dispositivos de inserção em síncrotrons de terceira geração. Este processo foi chamado de fonte bétatron, porém necessita de lasers de potência muito superior àquele necessário para a fonte K-alfa, que produzem intensidades superiores a $3 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$.

Neste projeto de pesquisa vamos reproduzir uma fonte de raios-X pulsados do tipo K-alfa. Para este objetivo utilizaremos um laser amplificado de femtosegundo com as seguintes características: energia por pulso da ordem de 1 mJ, comprimento de onda de 800 nm, taxa de repetição de 1 kHz e focalização da luz entre 10 a 2 μm de diâmetro. Com estas características se obtém facilmente intensidades superiores a 10^{17} W/cm^2 viabilizando assim a produção de raios-X pulsados com larguras de 100 femtosegundos. Os raios-X devem ser gerados em uma câmara de vácuo (10^{-3} mbar) onde o alvo sólido pode ser escolhido adequadamente. Durante o processo de formação dos raios-X cada pulso de laser que incide no alvo deve encontrar uma nova superfície, pois esta se destrói com a alta energia recebida. Isto pode ser realizado movimentando-se o alvo com uma velocidade de 5 mm/s permitindo o uso de um laser pulsado de 1 kHz. Também é necessário proteger as janelas ópticas e de raios-X dos débris (ablação de átomos) produzidos pelo laser ao atingir o alvo, utilizando bandas plásticas transparentes em movimento.

3.5. Teste de Focalização com Laser de Femtosegundo.

Para a realização do experimento foram comprados espelhos dielétricos (especialmente feitos para refletir um pulso centrado em 800nm) para que fosse feita uma montagem telescópica de modo a obter um feixe de perfil espacial limpo e bastante largo. Incidimos em um espelho parabólico de ouro esse feixe expandido de modo a criar um foco muito pequeno, a caracterização desse foco foi feita utilizando o sistema para ablacionar alguns materiais, como silício e outros semi-condutores. Um esquema da montagem pode ser visto na figura abaixo.

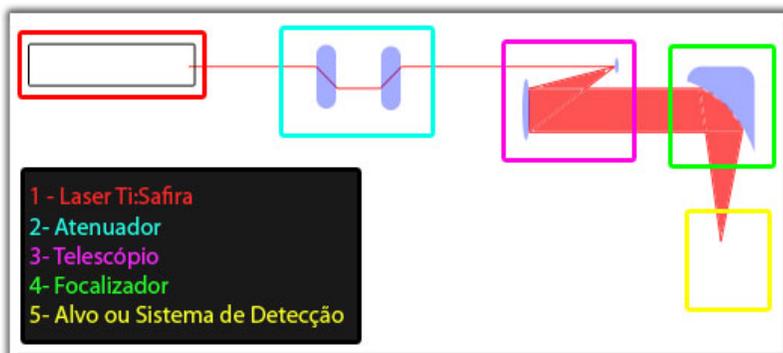


Figura 7 – Esquema da montagem para focalização do laser pulsado de femtosegundo utilizando espelhos dielétricos e um parabolóide de ouro.

4. Resultados

A montagem de focalização esta sendo utilizada no DEQ por alunos de pós-graduação para estudos de nano-partículas geradas por ablação com foco muito pequeno. As partículas obtidas por essa montagem tem se mostrado melhores e mais homogêneas que as montagens anteriores do grupo de ablação a laser. Vale ressaltar que o método empregado anteriormente utilizava apenas lentes normais (Vidro BK7) para focalizar o feixe, não levando em conta a complexidade de se trabalhar com feixes de femtosegundos.

Outro resultado importante obtido durante o projeto do aluno foi a implementação de rotinas para análise das imagens de policristais obtidas durante o experimento do KEK, onde o aluno foi capaz de programar os algoritmos necessários para analisar centros de imagens 2-D, fazer integrações radiais, gerar médias para cada tempo e potencia do laser, permitindo assim a análise de uma grande quantidade de dados que fora obtidos. Essa análise esta em andamento até o presente momento, e os resultados até o momento são bastante interessantes e promissores. Uma análise mais detalhada será feita para a publicação dos resultados internacionalmente.

5. Discussão

O próximo passo do projeto será levar a montagem de focalização para um laser de maior potencia de modo a conseguirmos uma maior intensidade no foco. Então transferir essa montagem de modo a deixar a focalização acontecer em vácuo e acertar um alvo metálico. A caracterização da radiação produzida e os problemas encontrados serão de grande ajuda para a montagem do laboratório de raios-X pulsados que esta sendo preparado para um projeto temático junto a FAPESP.

Os resultados dos experimentos de síncrotron também estão em processo de análise e vão ser publicados internacionalmente, mostrando assim a importância da implementação dessa área de pesquisa inédita no Brasil.

6. Considerações Finais

Os resultados obtidos até o presente momento indicam que a área de raios-X pulsados de femtosegundos e experimentos Pump-and-Probe são uma área com muito potencial para novas técnicas e descobertas. Em especial o estudo dos movimentos atômicos em tempos ultracurtos e de fenômenos físicos

em tempos ultracurtos, ou seja, fenômenos físicos fora do equilíbrio, são áreas que estão começando a ser exploradas e tem trazido resultados bastante interessantes para todas as áreas da ciências, tanto física como química e biologia. Portanto a implementação de um laboratório em raios-X de tempos ultra-curtos é de um grande interesse para a comunidade científica brasileira e são projetos como esse que estão nos auxiliando a tornar isso realidade.

7. Comentário do Orientador

O aluno Rafael Vescovi participou ativamente de atividades envolvendo o projeto de pesquisa deste relatório tendo contribuído muito bem para seu avanço. Em particular o Rafael estudou os conceitos envolvendo o uso de lasers pulsados de femtosegundo para produção de raios X e também o método experimental para realização de experimentos com a técnica de "pump and probe" que será utilizada para realizar experimentos de difração de raios X resolvidos no tempo. Além disto, o aluno participou de várias montagens experimentais envolvendo o uso de lasers amplificados de femtosegundo em particular a que lida com a focalização do feixe com espelho parabólico. Outra participação exemplar do Rafael consistiu em desenvolver códigos de tratamento de imagens de resultados de difração resolvida no tempo obtidos no síncrotron KEK de Tsukuba no Japão. A motivação e interesse do Rafael neste projeto foram muito bons e considero que o trabalho de iniciação científica foi amplamente realizado.

8. Referências

- [1] T. Katsouleas, Nature 431 (2004) 515; C. G. R. Geddes et al. Nature 431 (2004) 538; S. P. D. Mangles et al. Nature 431 (2004) 535; J. Faure et al. Nature 431 (2004) 541.
- [2] M. Lewenstein et al., Phys.Rev. A 49, 2117-2132 (1994).
- [3] S. Kazamias et al. Phys Rev. Lett. 90, 193901 (2003).
- [4] C. Rischel et al. Nature 390, 490 (1997); A. Rousse et al. Phys. Rev. E50, 2200 (1994).
- [5] A.H. Zewail, in Les Prix Nobel (Almqvist & Wiksell, Stockholm, 1999), pp. 110-203.
- [6] C. Giles et al., J. Synchrotron Rad. 10 (2003) 421-423.
- [7] M. G. Hönnicke, G. Kellerman, H. S. Rocha, C. Giles, G. Tirao, I. Mazzaro, R. T. Lopes, C. Cusatis, Rev. Sci. Instrum. 76(9) (2005).
- [8] C. Giles, J. R. L. Mardegan, Projeto FAPESP 2007/02349-0.

- [9] R. Toth et al. *Rev. Sci. Instrum.* 76, 083701 (2005).
- [10] J. Keyriliäinen et al., *Eur. J. Radiol.* 53 (2005) 226-237.
- [11] L. A. Silva, *Classificação de Nódulos Mamográficos Utilizando um Comitê de Redes Neurais Artificiais*, Tese de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil (2005).
- [12] J. T. Bushberg et al., *The Essential Physics of Medical Imaging*. Lippincott Williams & Wilkins, (2001).
- [13] R. Fitzgerald, *Phys. Today* 53 (2000) 23.
- [14] M. J. Kitchen et al., *Br. J. Radiology* 78 (2005) 1018-1027.
- [15] F. Arfelli et al., *Radiology* 215 (2000) 286–293.
- [16] T. J. Davis, D. Gao, T. E. Guruyev, A. W. Stevenson, S. W. Wilkins, et al., *Nature* 373, 595-598 (1995).
- [17] E. Förster, K. Goetz, P. Zaumsell, et al., *Kristall und Technik* 15, 937-945 (1980).
- [18] J. Keyriliäinen, *Diffraction-enhanced X-ray imaging of in vitro breast tumours*, Tese de Doutorado, Departamento de Física da Universidade de Helsinki, Finlândia (2004).
- [19] M. Ando, S. Hosoya, et al., *Proc. 6th Int. Conf. of X-ray Optics and Microanalysis*, edited by G Shinoda et al., p. 63. Tokyo: University of Tokyo (1972).
- [20] T. Takeda, A. Momose et al., *Med Imaging Technol* 20 (2002) OP8-39.
- [21] Canadian Light Source, <http://www.cls.usask.ca> - acessado em 22/06/2007.
- [22] Australian Synchrotron, <http://www.synchrotron.vic.gov.au> - acessado em 22/06/2007.
- [23] E. D. Pisano et al., *Radiology* 214 (2000) 895-901
- [24] V. A. Bushuev, E. A. Beliaevskaya, V. N. Ingal, *Il Nuovo Cimento* 19D(2-4) (1997) 513- 520.
- [25] V. N. Ingal, E. A. Beliaevskaya, *Physica Medica* XII(2) (1996) 75-81.
- [26] R. A. Lewis, C. J. Hall, A. P. Hufton, S. Evans, R. H. Menk, F. Arfelli, L. Rigon, G. Tromba, D. R. Dance, I. O. Ellis, A. Evans, E. Jacobs, S. E. Pinder, K. D. Rogers, *Br. J. Radiol.* 76(905) (2003) 301-308.
- [27] M. M. Murnane, H. C. Kapteyn, M. D. Rosen e R. W. Falcone, *Science* 251(1991) 531-536.
- [28] A. McPherson, G. Gibson, H. Jara, U. Johann, T. S. Luk, I. A. McIntyre, K. Boyer e C. K. Rhodes, *J. Opt. Soc. Am. B* 4(1987), 595-601.
- [29] M. Ferray, A. L'Huillier, X. F. Li, L. A. Lompré, G. Mainfray e C. Manus, *J. Phys. B. At. Mol. Opt. Phys.* 21(1988) L31.
- [30] Z. Chang, A. Rundquist, H. Wang, H. C. Kapteyn e M. Murnane, *Phys. Rev. Lett.* 79(1997) 2967-2970.
- [31] A. Rousse et al., *Phys. Rev. E* 50(1997) 7179.

- [32] C. Rischel, A. Rousse et al., *Nature* 390(1997) 490.
- [33] A. Rousse, K. Ta Phuoc et al., *Phys. Rev. Lett.* (setembro2004).
- [34] A. Rousse, K. Ta Phuoc, R. Shah, A. Pukhov, E. Lefebvre, V. Malka, S. Kiselev, F. Burgy, J. P. Rousseau, D. Umstadter e D. Hulin¹, *Phys. Rev. Lett.* 93(2004), 135005.
- [35] M. Bargheer, N. Zhavoronkov, Y. Gritsai, J. C. Woo, D. S. Kim, M. Woerner, T. Elsaesser, *Science* 306(2004) 1771-1773.