

Free Electron Laser

*Edyvania Emily Pereira Martins**

Junho 2018

Resumo

O primeiro *Free Electron Laser*, FEL, foi articulado na década de 1970 e operava com comprimento de onda de $3.417 \mu\text{m}$ e potência de saída de 0.36 W. Diferente dos lasers usuais, os FEL podem ser ajustados para emitir radiação coerente em diversos comprimentos de onda.

Devido à força de Lorentz atuante sobre o feixe de elétrons no aparato, que conta com uma região de campo magnético periódico, radiação será emitida pelo feixe. Durante a interação entre elétrons e uma radiação incidente, o feixe será modulado em energia resultando numa modulação espacial, o que permite a coerência da radiação emitida.

Palavras-chaves: laser. laser de elétrons livres.

Abstract

The first Free Electron Laser, FEL, was built during the 1970's and operated in a wavelength of $3.417 \mu\text{m}$ and output power of 0.36 W. Unlike usual lasers, the FEL can be tuned to emit coherent radiation in a broad range of wavelengths.

Due to the Lorentz force acting on the beam of electrons in the apparatus, which counts with a periodic magnetic field region, radiation shall be emitted by the beam. During the interaction of the electrons with an incident radiation, the beam will be modulated in energy, and therefore will be spatially modulated, allowing coherence in the emitted radiation.

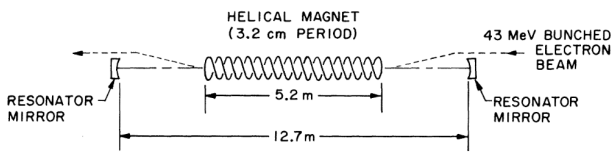
Key-words: laser. free electron laser.

*e.emily@usp.br

1 Introdução

O primeiro *Free Electron Laser*, FEL, foi articulado na década de 1970 por John Madey na universidade de Stanford. De acordo com os autores do primeiro artigo reportando o funcionamento de um laser de elétrons livres (MADEY et al., 1977), o aparato contava com um supercondutor helicoidal gerando um campo magnético de 2.4 kG (o equivalente a 0.24 T, cerca de 2×10^4 vezes maior que o campo magnético terrestre). O primeiro laser de elétrons livres teve comprimento de onda de 3.417 μm e potência de saída de 0.36 W. O esquema do primeiro FEL está representado na figura a seguir.

Figura 1 – Diagrama esquemático do primeiro Free Electron Laser. O período espacial λ_0 equivale à 3.2 cm.



Fonte: (MADEY et al., 1977)

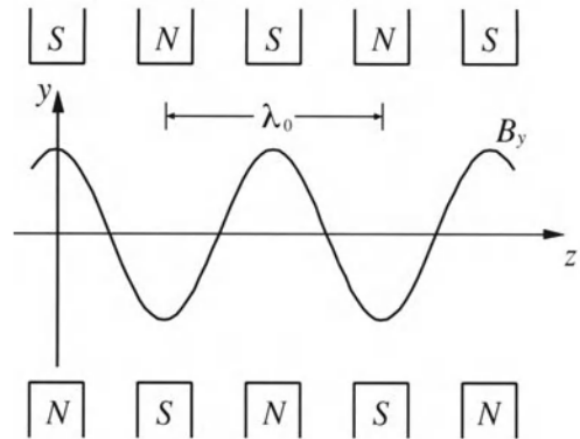
O princípio de funcionamento do FEL é baseado na interação de feixes de elétrons com uma onda eletromagnética num ambiente de vácuo sob ação de um campo magnético. Diferente dos lasers usuais, cujo comprimento de onda emitido está diretamente associado às características do material emissor (a radiação emitida é definida por transições discretas entre níveis quânticos da amostra), os FEL podem ser ajustados para emitir radiação coerente em diversos comprimentos de onda (modificando parâmetros do equipamento, por exemplo) (SALDIN; SCHNEIDMILLER; YURKOV, 2013).

A estrutura de um FEL é dividida em três partes principais: um acelerador para o feixe de elétrons, um conjunto de ímãs permanentes (chamado *wiggler* ou ondula-

dor) e um ressonador composto por um par de espelhos refletores (SHIOZAWA, 2013).

O elemento mais importante de um FEL é o ondulator, já que é responsável pela mudança periódica da trajetória do feixe de elétrons. Em um ondulator planar como o indicado na Figura 2, formado por uma sequência de dipolos magnéticos de polaridades opostas, o campo magnético transversal causará uma trajetória sinusoidal no feixe de partículas carregadas. É nessa etapa que surge a emissão de radiação como será detalhado na sessão seguinte.

Figura 2 – Arranjo de dipolos magnéticos formando um ondulator planar.



Fonte: (SHIOZAWA, 2013)

Ainda de acordo com Shiozawa, um elétron viajando ao longo do eixo central de um ondulator realiza um movimento periódico com o mesmo período espacial do campo magnético produzido pelo aparato, porém em direção perpendicular àquela do campo.

2 Mecanismo de um FEL

Partículas carregadas, como elétrons, emitem radiação ao passar por campos magnéticos. Devido à força de Lorentz atuante sobre o feixe de elétrons, uma componente transversal será adicionada ao movimento de cada elétron, que ao ser introdu-

zido no ondulator possuía apenas componente longitudinal.

Se o campo magnético oscila na direção vertical, como indicado na Figura 2, com periodicidade λ_0 , é possível derivar as equações de movimento e portanto descrever as velocidades transversal e longitudinal ao realizar uma média sobre o período do ondulator:

$$v_x \cong \frac{cK}{\gamma\sqrt{2}}, \quad v_z \cong c\left[1 - \frac{1}{2\gamma^{*2}}\right] \quad (1)$$

onde tomamos que

$$\gamma^* = \frac{\gamma}{\sqrt{1 + \frac{K^2}{2}}}, \quad K = \frac{eB_0\lambda_0}{2\pi m_0 c^2} \quad (2)$$

K é o chamado parâmetro do ondulator.

Quando uma radiação se propaga ao longo de um campo magnético transversal periódico, esta se acopla ao campo gerando um batimento (ou *beat wave*). O comprimento de onda do batimento é menor que o da radiação incidente e portanto pode se propagar com velocidade menor que a da luz. Se o conjunto de elétrons viaja com velocidade superior à do batimento, a maior parte dos elétrons será desacelerada, gerando uma amplificação da radiação. Este caso se mostra análogo ao processo de emissão estimulada para átomos excitados.

De acordo com (DATTOLI et al., 2010), após um período do ondulator, a radiação emitida pelo feixe de elétrons sob ação do campo magnético terá avançado o próprio feixe por uma quantidade :

$$\delta \sim (c - v_z) \frac{\lambda_0}{c} = \frac{\lambda_0}{2\gamma^2} (1 + K^2/2) \quad (3)$$

Como δ representa uma fase, para que haja interferência construtiva com a

radiação emitida no próximo período do ondulator temos a seguinte condição, com n inteiro:

$$\delta = n\lambda \quad (4)$$

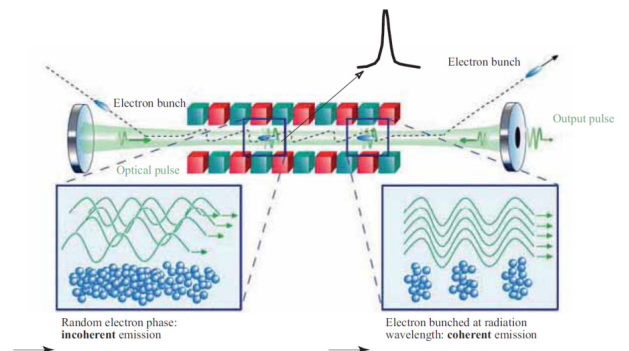
A partir das equações 3 e 4, definiremos o comprimento de onda da radiação devido ao ondulator:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{2n\gamma^2} (1 + K^2/2) \quad (5)$$

Deve-se notar que $n=1$ representa o comprimento de onda fundamental, enquanto $n > 1$ representa harmônicos superiores.

O pulso de radiação tem a estrutura de uma função degrau com comprimento $N\delta$, correspondente à um pulso cuja duração é de $\Delta\tau \simeq \frac{N\delta}{c}$. Assim, a distribuição espectral correspondente é dada pela transformada de Fourier deste pulso. Verificamos novamente a similaridade com o processo de laser usual, o que é equivalente a comparar com a similaridade de um processo de emissão estimulada, com a adição da coerência da radiação pelo conjunto de partículas emissoras.

Figura 3 – Formação de um pulso laser por um pulso do feixe de elétrons.



Fonte: (DATTOLI et al., 2010)

Como pode ser visto na Figura 3, durante a interação entre elétrons e radiação, o feixe é modulado em energia resultando numa modulação espacial (concentração de

elétrons em determinadas regiões) em concordância com o comprimento de onda da radiação. Essa modulação espacial permite a coerência da radiação emitida.

Aqui demonstramos propriedades gerais do FEL, porém há outros aspectos que trazem mais complexidade à uma descrição detalhada deste processo, como efeitos da distribuição de energia dos elétrons, que não cabem no escopo deste estudo.

3 Aplicações

Devido ao grande intervalo de frequências alcançado por FEL, suas aplicações são diversas. Uma vez que um mesmo equipamento pode gerar lasers desde o microondas até o raio-X, os custos acabam sendo reduzidos.

Além de ser fonte de radiação coerente fundamental em diversos experimentos científicos, as aplicações na medicina forma um aspecto diretamente funcional deste tipo de aparato, como na utilização de lasers em procedimentos cirúrgicos.

Por fim, há possibilidade da utilização de FEL como arma de defesa anti-míssil. Este aspecto bélico do FEL acompanha a própria criação do aparato, uma vez que a pesquisa inicial foi parcialmente fomentada pela agência americana *Air Force Office of Scientific Research*.

De acordo com (BRINKMANN et al., 2018), uma possível aplicação para FEL na faixa dos raio-X será a fotônica nuclear. Ao ajustar a largura de banda da radiação emitida (que por sua vez é dependente de parâmetros do ondulator e da estabilidade e uniformidade dos campos magnéticos gerados), seria possível se aproximar da largura de banda intrínseca dos estados nucleares, permitindo a excitação de um único estado selecionado. Ainda de acordo com os autores, no estado da arte, os onduladores apresentam período espacial de $\lambda_0 = 0.4mm$ e campo magnético com intensidade de $B = 0.5$ T.

4 Conclusão

Lasers formados por feixes de elétrons livre oferecem a grande vantagem da tunabilidade: o comprimento de onda emitido pode ser selecionado ao ajustar o parâmetro do ondulator, K , que carrega informações do campo magnético aplicado sobre o feixe de partículas.

O processo de um FEL consiste na emissão espontânea por um feixe de elétrons livres em uma cavidade ótica, no armazenamento da radiação nesta cavidade e na amplificação dessa radiação por um mecanismo de emissão estimulada.

Referências

BRINKMANN, R. et al. High energy free electron laser for nuclear applications. *arXiv preprint arXiv:1804.00544*, 2018. Citado na página 4.

DATTOLI, G. et al. Introduction to the physics of free electron laser and comparison with conventional laser sources. *arXiv preprint arXiv:1010.1647*, 2010. Citado na página 3.

MADEY, J. M. et al. First Operation of a Free-Electron Laser. *Phys. Rev. Lett.*, v. 38, p. 892–894, 1977. Citado na página 2.

SALDIN, E. L.; SCHNEIDMILLER, E.; YURKOV, M. V. *The physics of free electron lasers*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013. Citado na página 2.

SHIOZAWA, T. *Classical relativistic electrodynamics: theory of light emission and application to free electron lasers*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013. Citado na página 2.