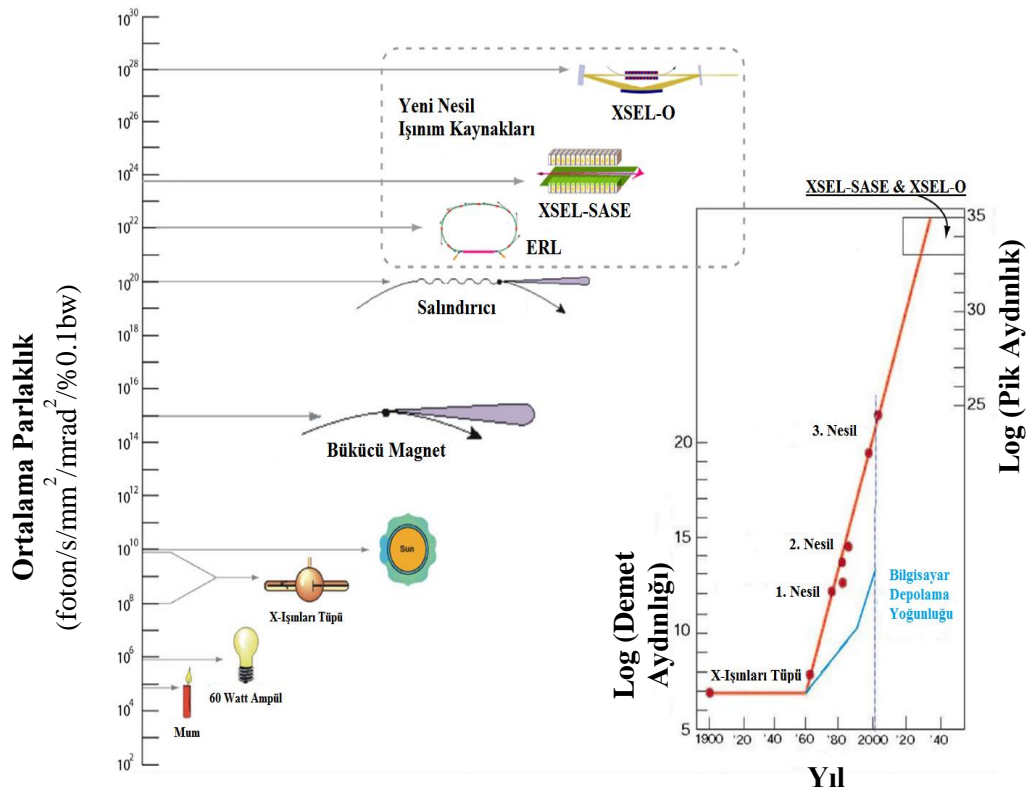


12. HIZLANDIRICIYA DAYALI IŞINIM KAYNAKLARI: SERBEST ELEKTRON LAZERİ

12.1. Giriş

20. Yüzyılın başlarından itibaren X-ışınları tüpünün keşfiyle, kullanıcıların yüksek parlaklık gereksinimleri her geçen yıl hızla artmıştır. 1970'lerin başlarında bilim adamları, parçacık fiziği deneyleri için tasarlanan pozitron sinkrotronlarından bükücü magnet ışınımını keşfetmişlerdir (Şekil 12.1). Bu parazitik ışınımlara, 1. nesil ışınım kaynakları denilmektedir. Daha sonraları zigzaglayıcı ve salındırıcı magnetlerin keşfiyle, elektron sinkrotronlarına dayalı 2. nesil ışınım kaynakları geliştirilmiştir. Fakat, elektron demetlerinin yüksek yayılım değerinden dolayı ($> 100 \mu\text{m}$), bu magnetik yapılardan elde edilen ışınım kalitesi istenilen değerlere ulaşamamıştır. Akı ve parlaklık değerleri yetersizdir.

1980'lerden sonra, gelişen teknoloji ile, elektron demetlerinin yayılım değeri $20 \mu\text{m} < \epsilon < 100 \mu\text{m}$ aralığına kadar düşürülerek akı ve parlaklık değerleri nispeten yükselmiştir. Bu gruba ise 3. nesil ışınım kaynakları denilmektedir. 2000'li yılların başında bilim adamları, modern linaklar aracılığı ile elektron demetinin yayılımının $20 \mu\text{m}$ 'den daha az olabileceğini göstermişlerdir. Bundan dolayı, linaklara dayalı 4. nesil ışınım kaynakları halen kullanılmakta ve her geçen gün hızla geliştirilmektedirler.

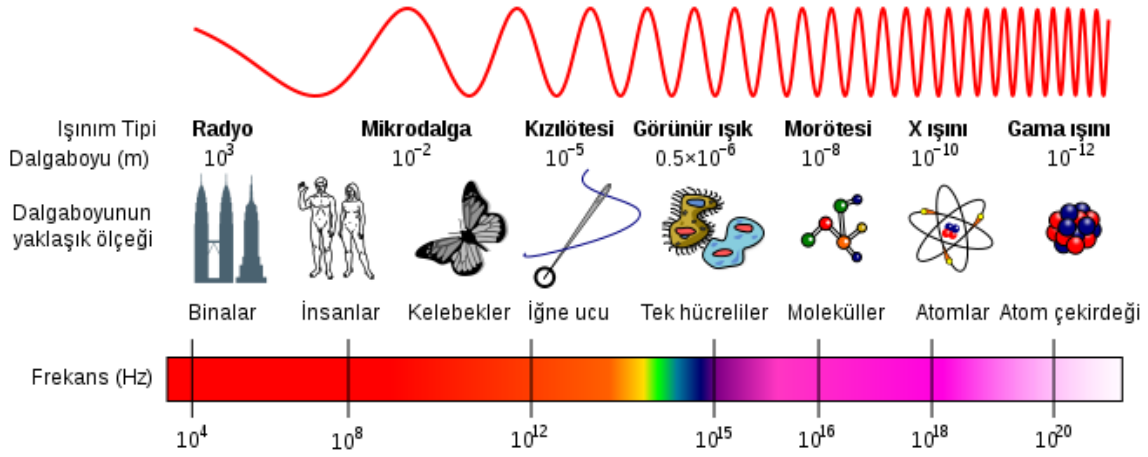


Şekil 12.1. Işınım kaynaklarının parlaklıklarının yıllara göre gelişimi

12.2. Serbest Elektron Lazeri Üretim Modları

Günümüzde hızlandırıcılara dayalı 4. nesil ışınım kaynakları (serbest elektron lazerleri), üç farklı yolla elde edilmektedir. Bunlardan birincisi yükselteç mod, ikincisi osilatör mod, üçüncüsü ise kendiliğinden genlik artımlı yayılım (SASE) modudur. İlk

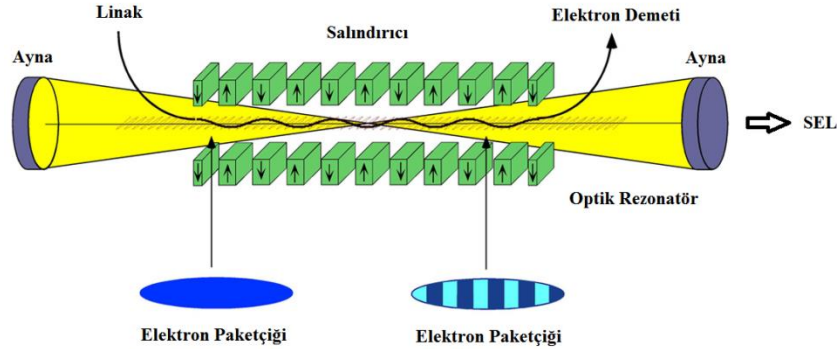
iki mod ile, elektromagnetik spektrumun (Şekil 6.2) kızılötesi bölgesinde koherent serbest elektron lazeri (SEL) üretilebilmektedir.



Şekil 12.2 Elektromagnetik spektrum

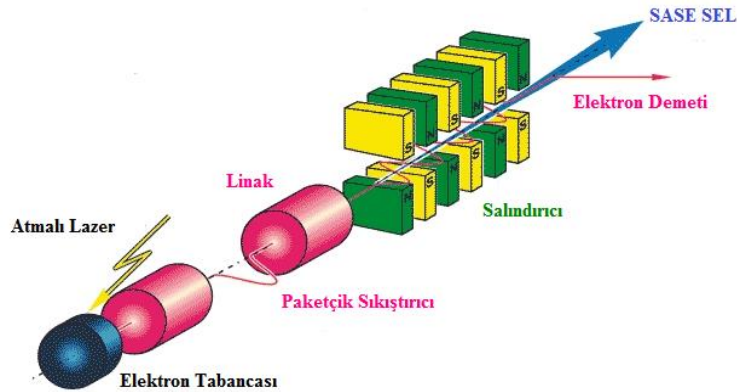
Dünyadaki pek çok doğrusal hızlandırıcı tesisi, enerji aralığına bağlı olarak osilatör yada SASE modunda yüksek güçlü SEL üretimi yapmaktadır. Tipik olarak, MeV enerjili linaklar için osilatör mod kullanılırken, GeV enerjili linaklar içinse SASE modu tercih edilmektedir. Osilatör modda (Şekil 6.3) linaktan çıkan elektron demeti, optik kavite adı verilen rezonatör yapıya gönderilir. Optik kavite yapısı, salındırıcı magnetin iki adet yansıtıcı aynanın arasına konulmasıyla oluşturulur. Salındırıcı magnetin içinden geçen elektron demeti ışımaya yarar. Bu ışınım aynalardan defalarca yansıtılarak doyuma

ulaştığında, ortasında küçük bir delik bulunan aynadan dışarı alınarak deney istasyonlarına yönlendirilir.



Şekil 12.3 Osilatör SEL'in şematik görünümü

Ancak, vakum ultraviolet (VUV), yumuşak X-ışınları ve hatta X-ışınları bölgesinde, yansıtıcı bir ayna bulunmamaktadır. Bundan dolayı, GeV enerjili elektron demetleri uzun bir salındırıcıdan tek seferde geçirilerek, doyuma ulaştığında dışarı alınır. Bu yolla elde edilen serbest elektron lazerlerine SASE SEL denilmektedir. Şekil 6.4'te SASE modunun şematik görünümü verilmektedir.

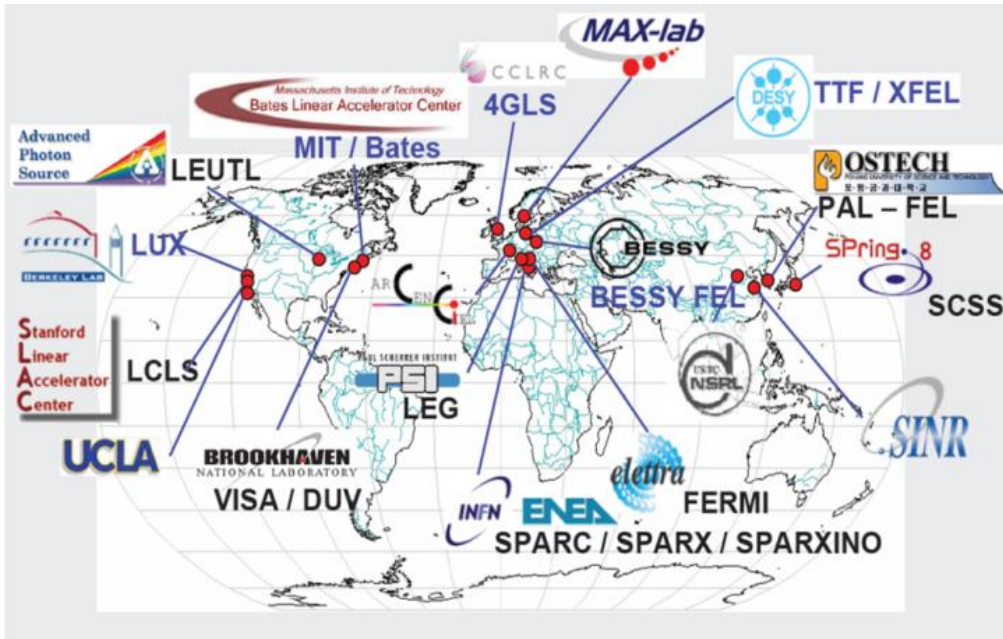


Şekil 12.4 SASE modunun şematik görünümü

6.3 Dünyadaki GeV Enerjili SASE Serbest Elektron Lazeri Tesisleri

Şekil 12.5'te, dünyadaki çalışmakta ve öneri aşamasında olan SASE SEL laboratuvarlarının dağılımı gösterilmektedir. Mavi ile yazılmış olanlar süperiletken linaklara dayalı, siyahlar ise normal iletken linaklara dayalı tesisleri temsil etmektedir. Şekil 12.5'teki TTF laboratuvarı (daha sonra FLASH olarak modifiye edilmiştir) ve

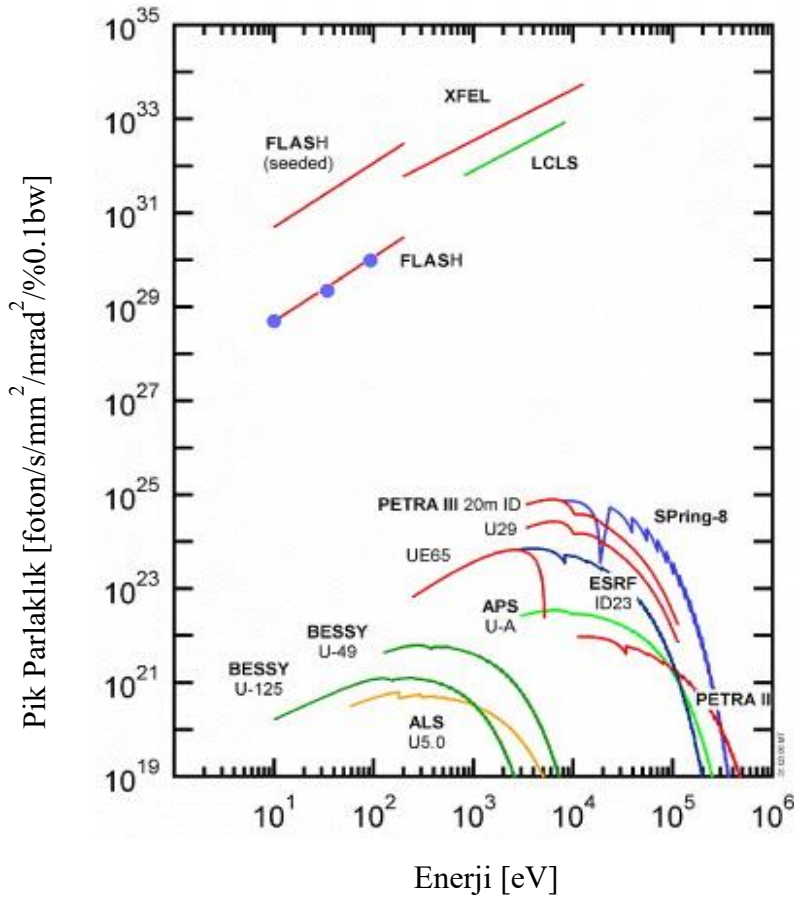
4GLS önerisi (New Light Source projesi olarak güncellenmiştir), süperiletken elektron linaklarına dayalıdır. SCSS laboratuvarı, FERMI@Elettra ve SPARC/SPARX/SPARXINO projeleri, normal iletken elektron linaklarına dayalıdır. Ayrıca, 2017 yılında hizmete giren European XFEL tesisi (DESY, Hamburg, Almanya) süperiletken elektron linakına dayalı olarak tasarlanmıştır.



Şekil 12.5. Dünyadaki çalışmakta ve öneri aşamasında olan SASE SEL laboratuvarlarının dağılımı

Şekil 12.6'da, üçüncü nesil sinkrotron ışımı ve dördüncü nesil SASE SEL laboratuvarlarının pik parlaklık aralıklarının foton enerjilerine göre dağılımı gösterilmiştir. x-ekseninden görüldüğü gibi, 10^2 - 10^3 eV foton enerjisi aralığında (VUV-

yumuşak X-Işınları bölgesi), SASE modu ile oldukça yüksek ($\sim 10^{30}$ - 10^{33} foton/s/mm²/mrad²/%0.1bw) parlaklık değerleri elde edilebilmektedir.

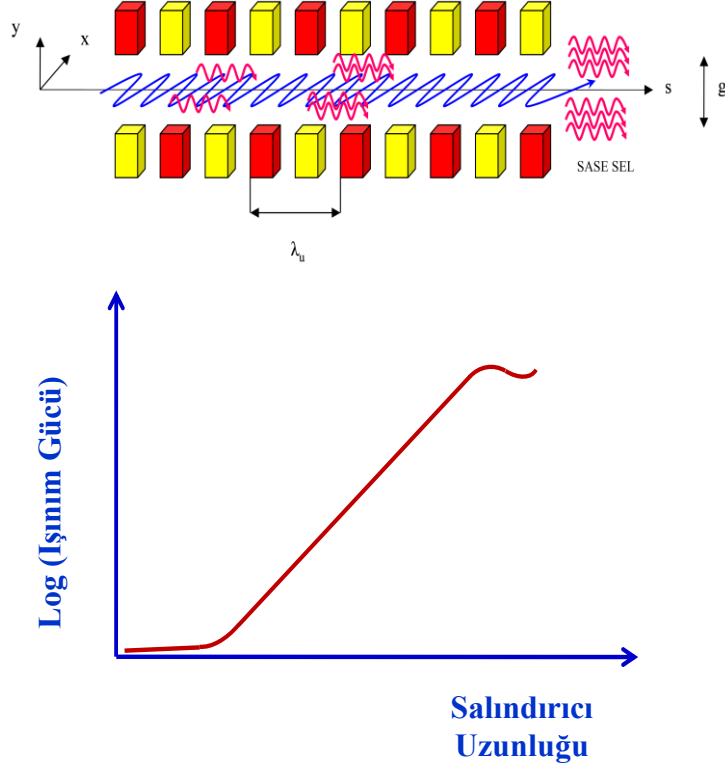


Şekil 12.6. Sinkrotron ışınımı ve SASE SEL ışınımı pik parlaklıklarının foton enerjisine göre dağılımı

12.4. SASE Serbest Elektron Lazeri Optimizasyonu

Şekil 12.7'de, SASE modu için düzlemsel bir salıdırıcı boyunca lazer doyumunun şematik görünümü verilmektedir. Salıdırıcının alt ve üst düzlemleri arasındaki mesafeye salıdırıcı açıklığı (g), iki zıt kutubun (N ve S) başlangıç veya bitiş noktaları arasındaki mesafeye ise salıdırıcı periyodu (λ_u) denilmektedir. Linaktan çıkan elektron demeti salıdırıcıya girip s boyunca ilerken, periyodik magnetik kuvvetlere ($F = evxB$) maruz kalarak x düzleminde sinüsoidal salınım yapmaya zorlanır. Salıdırıcı girişinde

gürültü olarak adlandırılan başlangıç ışınması, salındırıcı boyunca şiddetini artırarak doyuma ulaşır ve çıkış noktasında yüksek güçlü koherent lazer elde edilir.



Şekil 12.7 SASE modunda SEL üretiminin şematik görünümü

Salındırıcının kutupları arasında oluşan pik magnetik alan, salındırıcı açıklığına ve periyoduna bağlı olarak Denklem (12.1) ile belirlenir. b ve c katsayıları boyutsuz olup, a katsayısı magnetik alan (Tesla) boyutundadır.

$$B_{pik} = a \text{Exp} \left[b \frac{g}{\lambda_u} + c \left(\frac{g}{\lambda_u} \right)^2 \right] \quad (12.1)$$

Salındırıcıların magnetik alan şiddetlerinin ölçüsü ise, K parametresi (Denklem 12.2) ile belirlenir. K parametresi tipik olarak, salındırıcılar için 3'ten küçük, zigzaglayıcılar içinse 3'ten büyüktür.

$$K = 0.934 \lambda_u [cm] B_{pik} [T] \quad (12.2)$$

Düzlemsel salındırıcılar için, elde edilecek serbest elektron lazerinin dalgaboyu, Denklem (6.3) ile hesaplanır.

$$\lambda_{SEL} = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right) \quad (12.3)$$

Lazer kalitesinin ölçüleri olan q niceliği ve Pierce (ρ) parametresi, sırasıyla Denklem (12.4) ve (12.5) ile belirlenir.

$$q = \left\{ \gamma \frac{K^2}{\left(1 + \frac{K^2}{2}\right)^2} \left(J \left[0, \frac{K^2}{4} \right] - J \left[1, \frac{K^2}{4} \right] \right)^2 \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (12.4)$$

$$\rho = \left\{ \frac{\gamma \lambda_{SEL}^2 r_e n_e}{8\pi} \frac{K^2}{\left(1 + \frac{K^2}{2}\right)^2} \left(J \left[0, \frac{K^2}{4} \right] - J \left[1, \frac{K^2}{4} \right] \right)^2 \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (12.5)$$

Denklem (12.4) ve (12.5)'te, γ Lorentz faktörü, J ise 0. ve 1. mertebeden Bessel fonksiyonlarıdır. Denklem (12.5)'teki r_e klasik elektron yarıçapı (≈ 2.82 fm), ve n_e bir paketçikteki elektron yoğunluğudur.

SASE SEL optimizasyonunda, üç ana performans parametresi (bir boyutlu kazanç uzunluğu ($L_{G,1D}$), doyum gücü (P_{sat}) ve doyum uzunluğu (L_{sat})) dikkatle optimize

edilmelidir. Kazanç uzunluğu, salındırıcı boyunca ışınım gücünün e katına çıktığı uzunluktur. Bir boyutlu kazanç uzunluğu, Denklem (12.6) ile hesaplanmaktadır).

$$L_{G,1D} = \frac{\lambda_u}{4\pi\sqrt{3}\rho} \quad (12.6)$$

Bir boyutlu kazanç uzunluğundan üç boyutlu kazanç uzunluğuna ($L_{G,3D}$), Denklem (12.7)'deki bağıntı ile geçilmektedir.

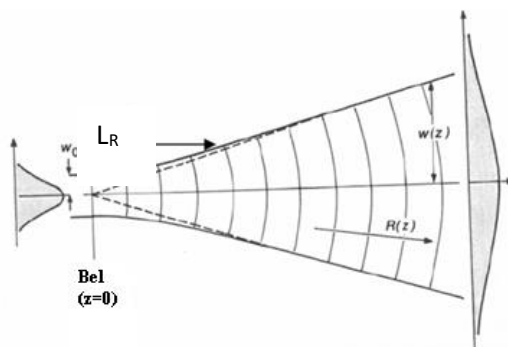
Denklem (12.7)'deki $1/(1+\eta)$ 'ya evrensel ölçeklendirme fonksiyonu denilmektedir ve η katsayısı aşağıdaki bağıntıdan yararlanılarak hesaplanır.

$$\eta = a_1\eta_d^{a_2} + a_3\eta_\varepsilon^{a_4} + a_5\eta_\gamma^{a_6} + a_7\eta_\varepsilon^{a_8}\eta_\gamma^{a_9} + a_{10}\eta_d^{a_{11}}\eta_\gamma^{a_{12}} + a_{13}\eta_d^{a_{14}}\eta_\varepsilon^{a_{15}} + a_{16}\eta_d^{a_{17}}\eta_\varepsilon^{a_{18}}\eta_\gamma^{a_{19}} \quad (12.8)$$

Denklem (6.8)'deki η_d katsayısı, kırınıma dayalı kazanç azalımını ifade eden üç boyutlu uzaysal bir etkidir ve Denklem (16.9) ile belirlenir.

$$\eta_d = \frac{L_{G,1D}}{L_R} \quad (12.9)$$

Denklem (6.9)'daki L_R , demet yarıçapının yayılma doğrultusu boyunca bel kısmından itibaren $\sqrt{2}$ katına çıktığı "Rayleigh" uzunluğudur (Şekil 6.8) ve Denklem (6.10) ile bulunur. Şekil 6.8'deki w_0 , demetin bel kısmındaki yarıçapıdır.



Şekil 12.8 Rayleigh uzunluğunun şematik tanımı

$$L_R = \frac{4\pi\sigma_x^2}{\lambda_{SEL}} \quad (12.10)$$

Denklem (12.10)'daki σ_x , demetin x doğrultusundaki rms boyudur. Denklem (12.8)'deki η_ε ise, emittanstan dolayı elektronun boyuna hız yayılımına bağlı kazanç azalımıdır ve Denklem (12.11) ile hesaplanır.

$$\eta_\varepsilon = \frac{4\pi\varepsilon L_{G,1D}}{\beta\lambda_{SEL}} \quad (12.11)$$

Denklem (6.11)'deki β parametresi beta fonksiyonu olmak üzere, ε normalize olmayan enine emittanstır. Denklem (6.8)'deki η_γ ise, enerji yayılımından dolayı elektronun boyuna hız yayılımına bağlı kazanç azalımıdır ve Denklem (6.12) ile bulunur (Xie 1995).

$$\eta_\gamma = \frac{4\pi\sigma_e L_{G,1D}}{\lambda_u E} \quad (12.12)$$

Denklem (12.12)'deki σ_e rms enerji yayılımı olmak üzere (MeV cinsinden), E demet enerjisidir. Denklem (12.8)'deki a sabitleri ise şöyledir: $a_1 = 0.45$, $a_3 = 0.55$, $a_5 = 3$, $a_7 = 0.35$, $a_{10} = 51$, $a_{13} = 5.4$ ve $a_{16} = 1140$

SASE SEL optimizasyonunuda toplam salındırıcı uzunluğunu (L_u), doyum uzunluğu (L_{sat}) ve doyum gücü (P_{sat}) belirler. Doyum uzunluğunun belirlenebilmesi için, doyum gücünün bilinmesi gereklidir.

$$P_{sat} \approx \rho P_{demet} = 1.6\rho \left(\frac{L_{G,1D}}{L_{G,3D}} \right)^2 \quad (12.13)$$

Lazer gücü salındırıcı boyunca doyuma ulaştıktan sonra, doyum uzunluğu Denklem (12.14)'teki gibi belirlenmiş olur. Daha sonra, elektron demeti bükücü bir magnetle

demet durdurucuya gönderilerek, oluşan lazer optik dalga klavuzlarıyla deney istasyonlarına yönlendirilir.

$$L_{sat} = L_{G,1D} \ln\left(\frac{9P_{sat}}{P_n}\right) \quad (12.14)$$

Denklem (12.14)'teki P_n ise, Denklem (12.15) ile belirlenen etkin giriş gürültü gücüdür (Xie 1995).

$$P_n = \frac{\rho^2 c E}{\lambda_{SEL}} \quad (12.15)$$

Salındırıcı çıkışında elde edilecek lazer atmasının enerjisi, Denklem (16.16) ile hesaplanmaktadır.

$$E_{SEL}[keV] = \frac{0.947nE^2[GeV]^2}{\lambda_u[cm] \left(1 + \frac{K^2}{2}\right)} \quad (12.16)$$

Elde edilecek lazerin harmonikleri, Denklem (12.16)'da $n = 1, 3, 5, \dots$ yazılarak bulunur. $n = 1$ durumu, temel harmonik olarak adlandırılmaktadır. Aynı demet enerjisi ile daha düşük dalgaboylarına yüksek harmonikler kullanılarak ulaşılabilmektedir ancak harmonik numarası arttıkça lazerin parlaklık değeri azalmaktadır. SEL deneylerinde

gerek duyulan yüksek parlaklık ihtiyacından dolayı, dünyadaki pek çok SEL tesisi birinci harmonikte çalıştırılmaktadır.

SASE SEL üretiminde sağlanması gerek üç temel koşul bulunmaktadır. Bunlardan ilki, Denklem (12.17)'de görüldüğü gibi, elde edilecek lazerin dalgaboyu elektron demetinin enine emittansının 4π katına büyük-eşit olmalıdır.

$$\varepsilon \leq \frac{\lambda_{SEL}}{4\pi} \quad (12.17)$$

İkinci koşul ise, Denklem (12.18)'de verildiği gibi elektron demetinin enerji yayılımı Pierce (ρ) parametresinden küçük olmalıdır.

$$\frac{\Delta E}{E} < \rho \quad (12.18)$$

Üçüncü koşulsu, Denklem (12.19)'daki gibi kazanç uzunluğu Rayleigh uzunluğundan küçük olmalıdır.

$$L_G < L_R \quad (12.19)$$

Problemler:

Problem 1. Paketçik yükü 1 nC, paketçik uzunluğu 150 μm ve paketçikler arası mesafesi 1 μs olan cw modunda bir elektron demetinin, ortalama ve pik akımlarını hesaplayınız.

Problem 2. Bir SASE SEL tesisi için, elde edilecek lazer atmasının enerjisini UV bölgesinden X-ışınları bölgesine kaydırabilmek için, linak ve salıdırıcı parametrelerinden hangileri ne şekilde (artırarak yada azaltarak) değiştirilmelidir?

Problem 3. Yumuşak X-ışınları bölgesinde bir SASE SEL elde etmek istediğinizde, elektron demetinin salıdırıcı girişindeki normalize emittansı hangi mertebede olmalıdır?

Problem 4. Denklem (6.1)'deki a, b ve c katsayıları sırasıyla 3.381, -4.73 ve 1.198 olan bir salıdırıcının, 1 GeV enerjili bir elektron linakının sonuna kurulduğunu düşününüz. Yaklaşık 3.18 nm dalgaboylu bir SASE SEL elde edebilmek için, salıdırıcı periyodu (λ_u) ve açıklığı (g) ne kadar olmalıdır? (Not: Hesaplamalarınızda, bu salıdırıcı konfigürasyonu için geçerli olan teknolojik limiti ($0.1 < g / \lambda_u < 1$) göz önünde bulundurunuz).

Problem 5. Dünyadaki çalışmakta ve proje aşamasında olan SASE SEL tesislerinin linak, salıdırıcı ve lazer parametrelerini araştırınız ve bu tesislerin birbirlerine göre üstün özelliklerini kıyaslayınız.