

# **Işınım Kaynakları Hakkında Temel Bilgiler**

Yrd. Doç. Dr. Zafer Nergiz  
NiĐde Üniversitesi

# Giriş

- Hızlandırıcılar başlangıçta nükleer fizik ve parçacık fiziğinde çarpıştırıcı olarak kurulmuştur.
- Son dönemde ise çoğunlukla ışınım kaynağı olarak kullanılmaktadır.
- Hızlandırıcılardan elde edilen ışınımın fizik, biyoloji, kimya ve temel bilimlerin diğer alanlarında çok sayıda kullanım alanı vardır.
- Proteinlerin yapı analizi, madde fiziği vs.

# Işınımın Kaynağı

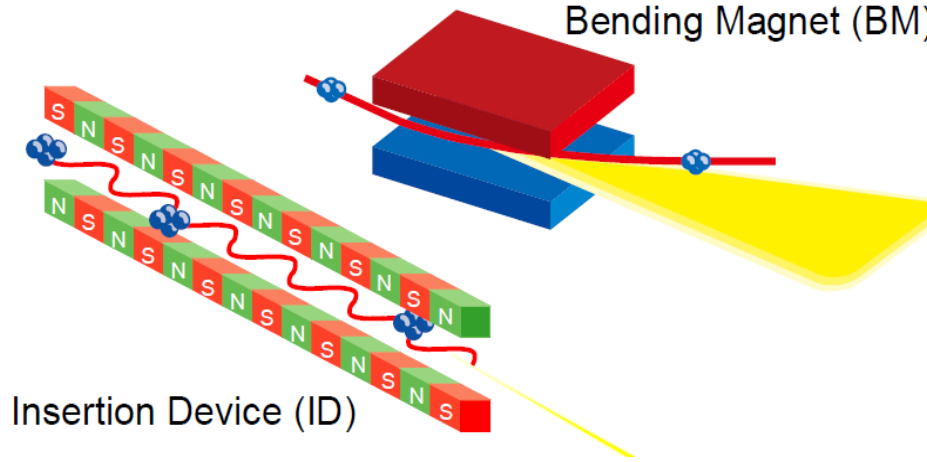
- 1873 yılında Maxwell Denklemleri  
Yük yoğunluğundaki değişme dışarıya doğru yayınlanan elektrik alanlar üretmektedir.
- 1887'de Heinrich Hertz bu dalgaları deneysel olarak göstermiştir.



Bu ne işe yarayacak sorusuna verdiği cevap:

**Bu sadece Maxwell'in haklı olduğunu gösteren bir deney. Hiç bir işe yarayacağını zannetmiyorum. 😊**

# Sinkrotron Işınımı Kaynakları



**Eğici Magnet:** Dairesel hızlandırıcıların zaten var olan elemanlarıdır. Parçacıkları sabit manyetik alan ile dairesel yörüngede tutarlar.

**Işınım Aletleri:** Elektron demetini periyodik olarak hareket ettirecek periyodik manyetik alan üretirler.

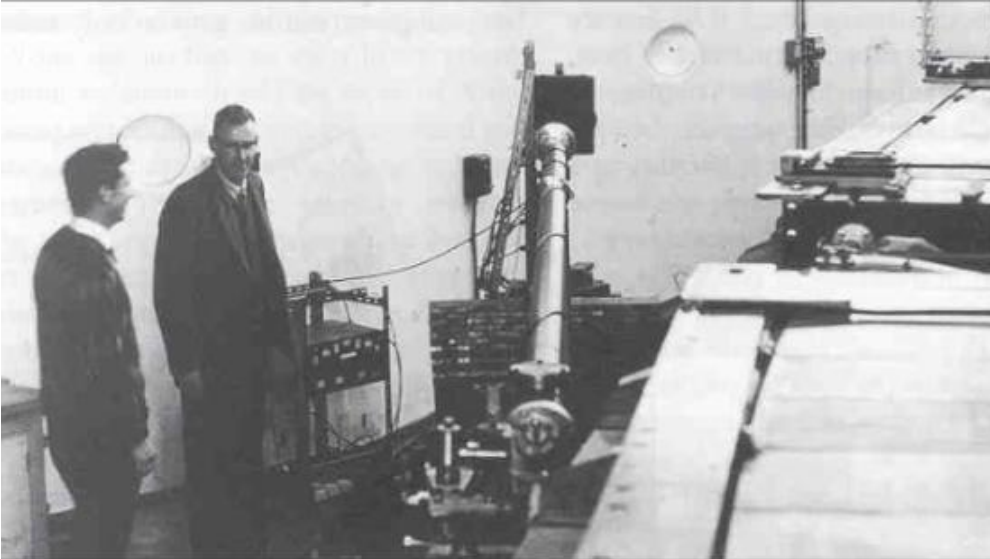
# Işınım Kaynakları Tarihçesi

- Birinci nesil SI kaynakları

Yüksek enerjili elektron sinkrotronları yüksek enerji fiziği için kullanılmaya başlandı.

Burada oluşan ışınım parazitik olarak görülüyordu.

Diğer fizikçiler çöp olarak algılanan bu ışınım ile ilgilenmeye başladılar.



1966'da Daresbury'de 6 GeV'lik Parçacık fiziği deneyleri için yapılmış NINA elektron sinkrotronunda ilk demet hattı.

- 2. Nesil SI ışınım kaynakları

70'lerin sonlarında kurulmaya başladılar. Eğici magnet ışınımını kullanıyorlardı.



1980'lerde Brookhaven'de demet hatları kurulmadan önce VUV halkası

Görüldüğü üzere salındırıcı magnetler için yer yok.



- **3. Nesil Işınım kaynakları**

Bunlarda öncelikli ışınım kaynakları salındırıcı (undulator) magnetlerdir.

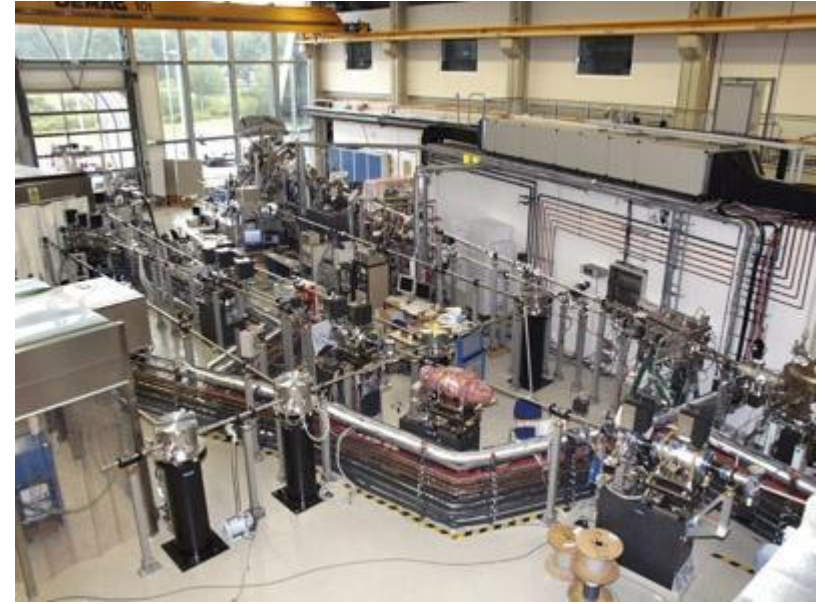
90'ların başlarında kullanılmaya başlanmıştır.



- 4. Nesil SI ışınım kaynakları

Tek geçişli ışınım kaynaklarıdır ve Serbest Elektron Lazeri (Free ElectronLaser) olarak isimlendirilirler. Sadece salındırıcı magnetler kullanılır

2000'lerde kurulmaya başlanmıştır.



FLASH FEL, DESY



# Sinkrotron Işınımının Özellikleri

- Sinkrotron ışınımı iki temel süreçle anlaşılabilir;

Lorentz Daralması

Doppler kayması

Periyodik bir manyetik alan (salıncırıcı) içerisinde hareket eden bir elektron düşünelim.

Bizim durgun çerçevemizde magnet periyodu  $\lambda_u$  ise lorentz daralması dolayısıyla elektron  $\lambda_u/\gamma$  olarak görecektir.

$\gamma$  rölativistik Lorentz faktörüdür

# Lorentz Faktörü

$$\gamma = \frac{E}{E_0} \quad \beta = v/c \quad \beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}$$

$c$  ışığın boşluktaki hızı

$v$  elektronun hızı

$\beta$  elektronun görelî hızı

$E$  elektron enerjisi (Örneğin 3000 MeV)

$E_0$  elektronun durgun kütle enerjisi (0.511 MeV)

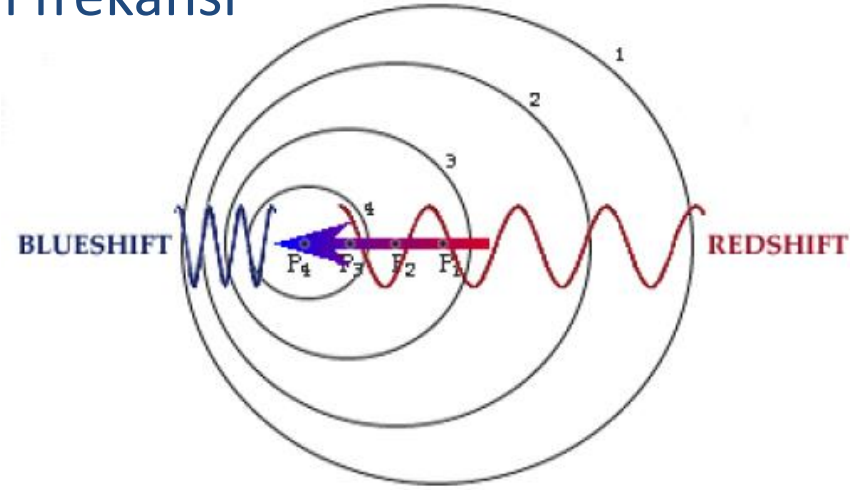
$\gamma$  faktörü bu durumda yaklaşık 5871 olur

# Görelî Doppler Kayması

Doppler etkisinin görelî şeklinde ışınımın frekansı bir gözlemcinin durgun çerçevesinde.

$$f = \gamma f' (1 - \beta \cos \theta')$$

Burada  $f'$  hareket eden kaynağın yayınladığı ışınımın frekansı  $\theta'$  ise ışığın açısıdır.



Gözlemciye doğru gelen ışınım için  $\theta' = \pi$

$$f = \gamma f' (1 + \beta)$$

Dalgaboyu cinsinden

$$\lambda = \frac{\lambda'}{\gamma(1 + \beta)} \sim \frac{\lambda'}{2\gamma}$$

# Lorentz ve Doppler etkilerinin birleşimi

Parçacığın yayınladığı ışınımın dalgaboyu  $\lambda_u/\gamma$

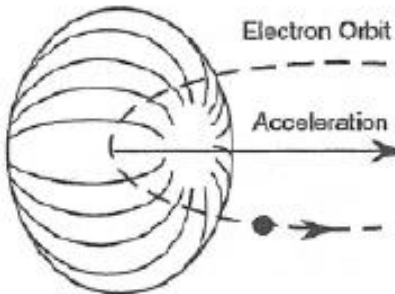
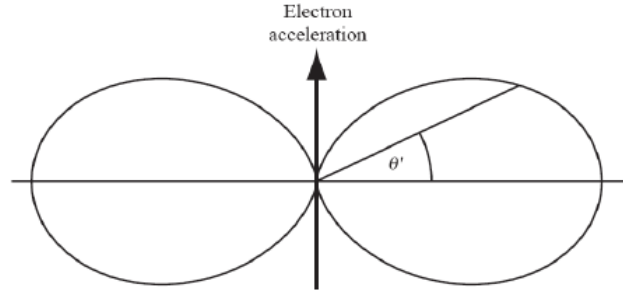
Parçacığın bize doğru gelmesinden dolayı  $2\gamma$  kadar bu dalgaboyu azalır.

Dolayısıyla gözlemlenen dalgaboyu  $\sim \lambda_u/2\gamma^2$

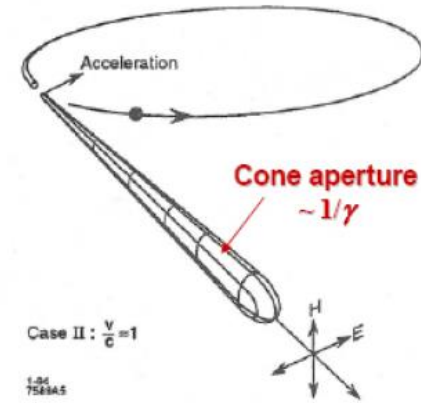
$\gamma$  faktörünün 1000'ler mertebesinde olduğu birkaç cm'lik salındırıcı periyoduna sahip bir salındırıcıdan nm mertebesinde (x-ışını) ışınım elde etmek mümkündür.

# Işınımın açısıl dağılımı

- Periyodik bir manyetik alan içerisinde periyodik bir salınım hareketi yapan bir parçacığın yayınladığı ışınımın dağılımı  $\sin^2 \theta'$  ile orantılıdır.



Case I :  $\frac{v}{c} \ll 1$



Case II :  $\frac{v}{c} \approx 1$

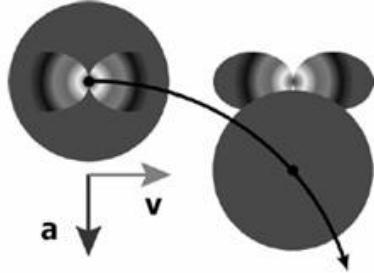
-94  
3A4

1-94  
758A5



# Boyuna ve Enine Hızlandırma

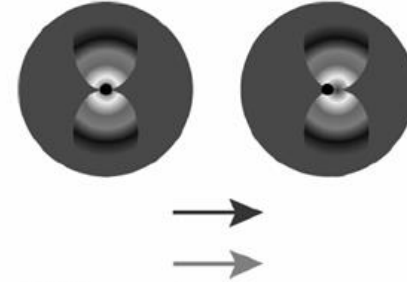
## Enine Durum



Radiation field quickly separates itself from the Coulomb field

$$P_{\perp} = \frac{2}{3} r_e mc^3 \frac{(\beta\gamma)^4}{\rho^2}$$

## Boyuna Durum



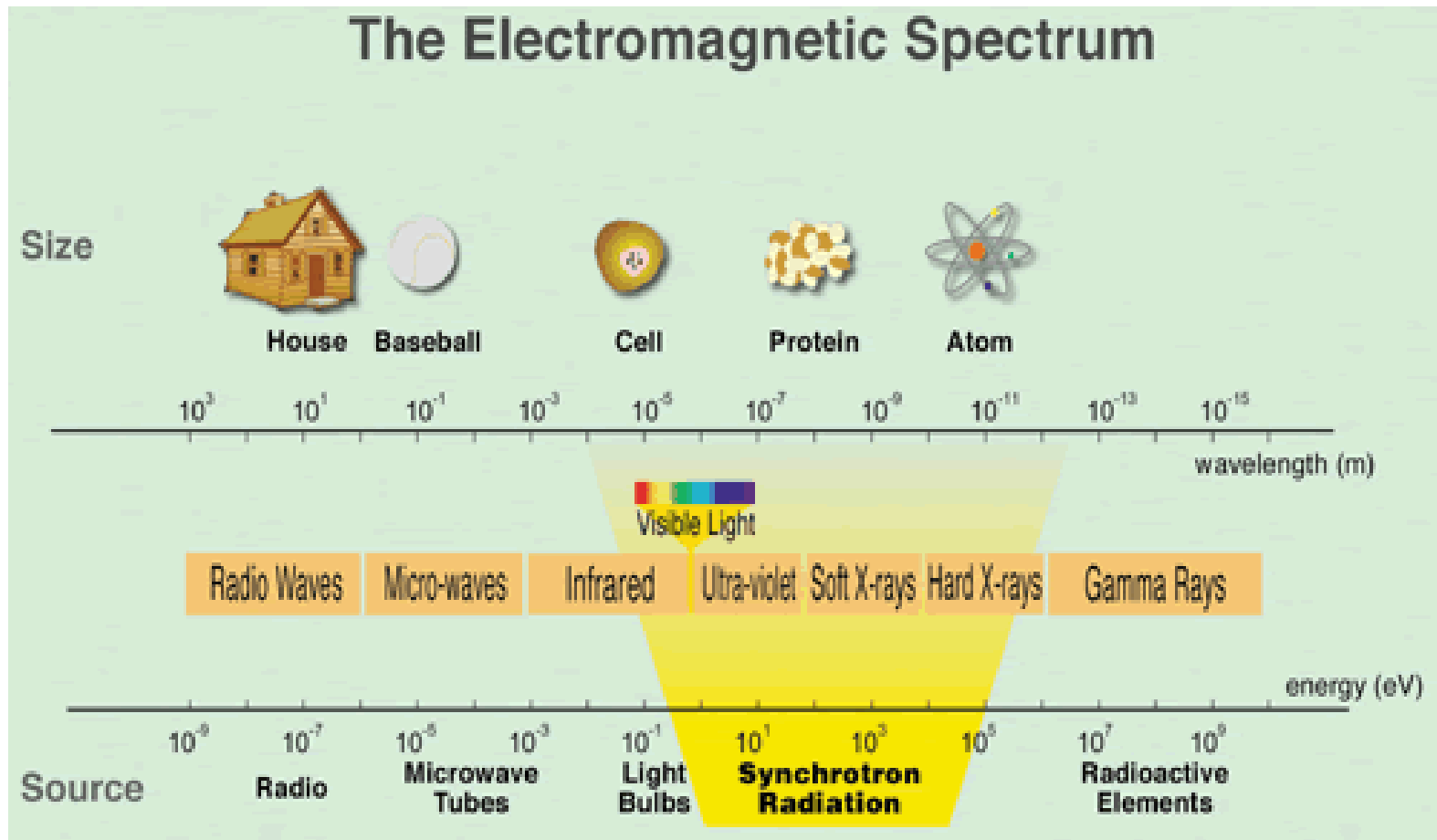
Radiation field cannot separate itself from the Coulomb field

$$P_{\parallel} = \frac{2}{3} \frac{r_e}{mc} \left( \frac{d p_{\parallel}}{dt} \right)^2$$

**İhmal edilebilir.**

Dairesel hızlandırma Işıma Gücünü çok büyük ölçüde artırmaktadır. Bu olay dairesel hızlandırıcılara ciddi bir enerji limiti koymakla beraber, sinkrotron ışınım kaynaklarının yapılmasına olanak tanımaktadır.

# SI Spektrumu

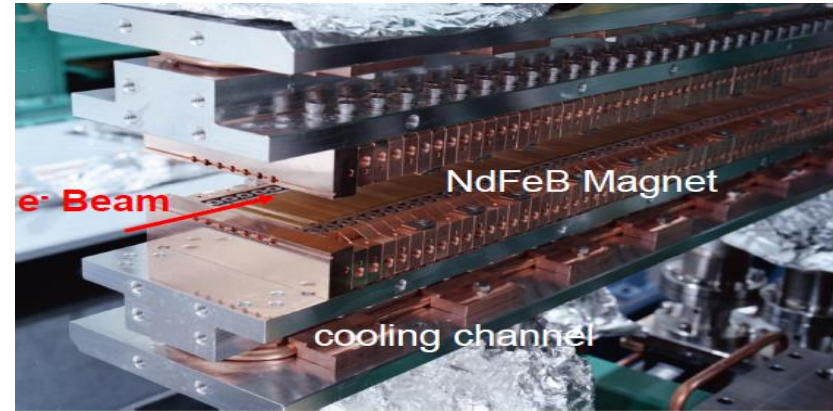
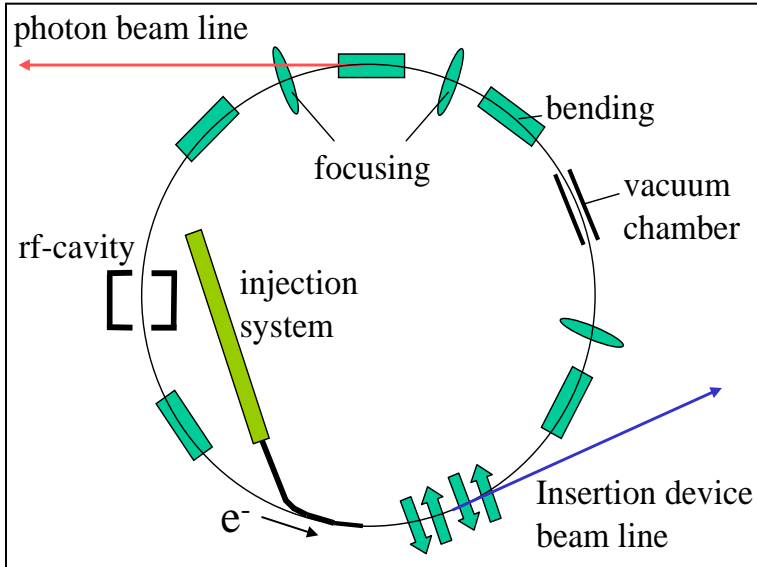


## Işınım Aletleri (Insertion Devices)

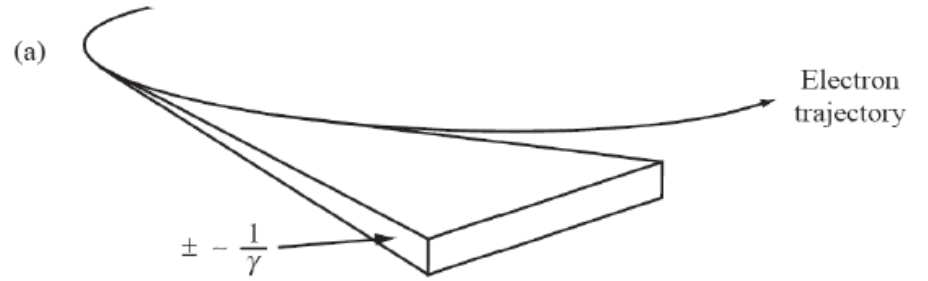
Eğici magnetler arasında ayrılmış boş bölgelere ışınım üretmek için yerleştirilirler.

Elektron demetini periyodik olarak hareket ettirecek periyodik manyetik alan üretirler.

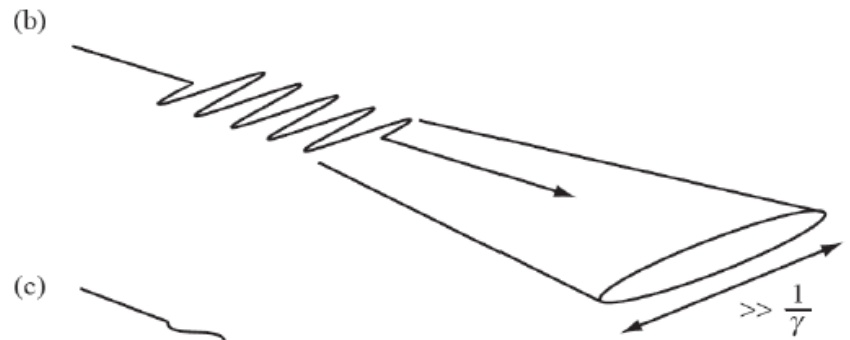
Wiggler (Zigzaglayıcı) ve Undulatör (Salındırıcı) olarak sınıflandırılırlar.



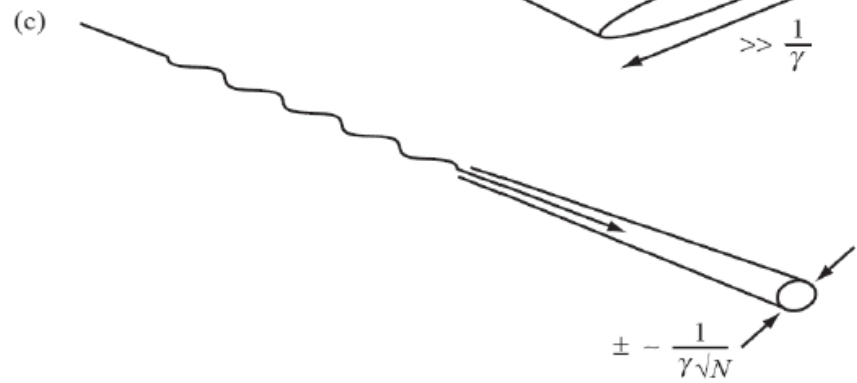
Eğici Magnet



Zigzaglayıcı



Salındırıcı



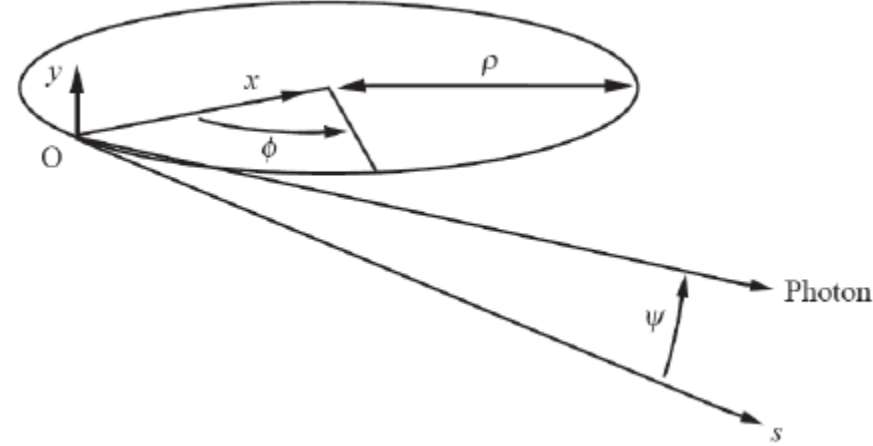
# Eğici Magnette SI

Kritik frekans eğici magnetten elde edilen spektrumunun ikiye ayıran frekanstır.

$$\omega_c = 3c\gamma^3/2\rho$$

$$\lambda_c = 2\pi c/\omega_c$$

$$\epsilon_c = \hbar\omega_c = \frac{3hc\gamma^3}{4\pi\rho}$$



Sinkrotron ışınımı tesislerinde yüksek ortalama güç sebebi ile vakum borusu soğutulmazsa erir (güç yoğunluğu çok daha fazladır). **Yayınlanan ışınımın toplam gücü:**

$$P_{\text{total}} = 88.46 \frac{E^4 I_b}{\rho_0}$$

Güç kW, Enerji GeV,  $I_b$  A,  $\rho_0$  m'dir

Yatay açı başına güç (W/mrad):

$$\frac{dP}{d\theta} = 14.08 \frac{E^4 I_b}{\rho_0}$$

Güç yoğunluğu (W/mrad<sup>2</sup>):

$$\left. \frac{dP}{d\Omega} \right|_{\psi=0} = 18.08 \frac{E^5 I_b}{\rho_0}$$

Ring	E (GeV)	$\rho$ (m)	$I_b$ (mA)	$P_{\text{Toplam}}$	$dP/d\theta$	$dp/d\Omega$	$\epsilon_c$
Diamond	3	7.15	300				

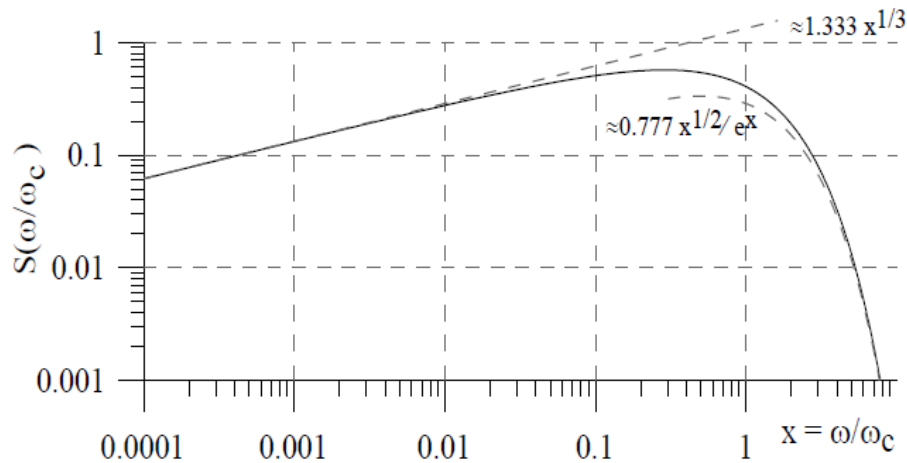


# Düşey gözlem açısı üzerinden integre edilmiş foton akısı

$$\frac{d\dot{N}_{ph}}{d\psi} = C_{\psi} EI \frac{\Delta\omega}{\omega} S\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$$

$$C_{\psi} = 3.9614 \cdot 10^{19}$$

$$S\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) = \frac{9\sqrt{3}}{8\pi} \frac{\omega}{\omega_c} \int_{\frac{\omega}{\omega_c}}^{\infty} K_{\frac{5}{3}}(x) dx$$



**Örnek:** E=3 GeV, I=0.5 A, r=6.6 m için Açısal toplam foton akısını hesaplayalım.

$$\hbar\omega_c = \frac{3}{2}\hbar c \frac{\gamma^2}{\rho} = 8983.8 \text{ eV}$$

$$\frac{\omega}{\omega_c} = 1 \longrightarrow S(1) \approx 0.4$$

Spektrometrenin çözünürlüğü:  $\frac{\Delta\omega}{\omega} = 10^{-4}$

$$\frac{d\dot{N}_{ph}}{d\psi} = 3.9614 \times 10^{19} \times 3 \times 0.5 \times 10^{-4} \times 0.4 = 2.37 \times 10^{15} \frac{\text{foton}}{\text{s rad}}$$

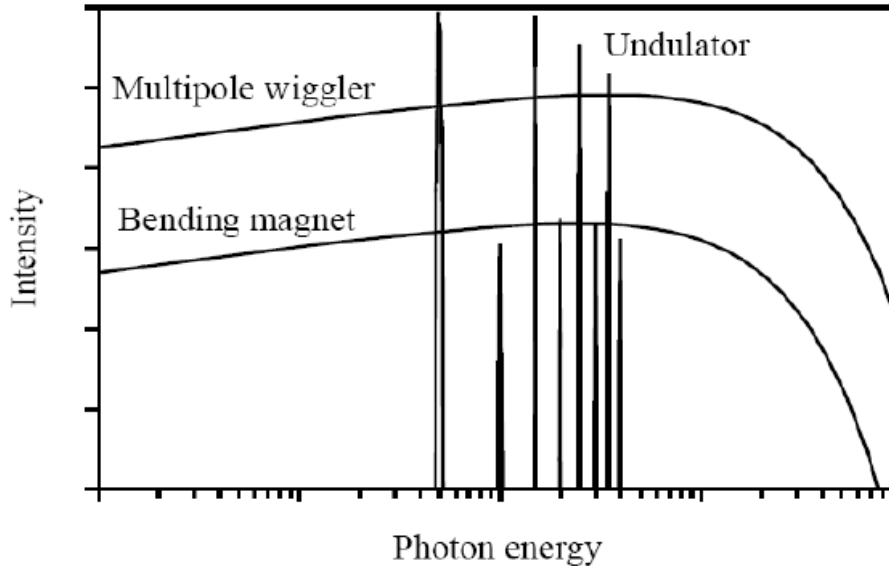
Demet hattının akseptansı  $\longrightarrow \Delta\psi \approx 3\text{mrad}$

Numune Üzerindeki foton akısı  $\longrightarrow \dot{N}_{ph} = 7.1 \times 10^{12} \frac{\text{foton}}{\text{s}}$

# İŞINIM ALETLERİNDE Sİ

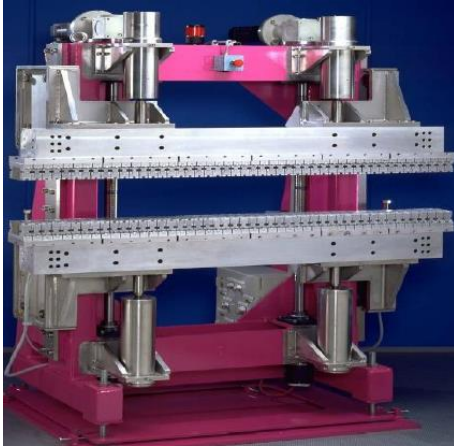
**Salındırıcılar:** Elektronlar zayıf manyetik alanla periyodik olarak salındırılırlar. Parçacıklar, dalgaboyu periyodik hareketin  $\lambda^2$ 'ye oranı olacak şekilde periyodik pikler şeklinde oluşurlar

**Zigzaglayıcılar:** Elektronlar kuvvetli manyetik alanla periyodik olarak salındırılırlar. Burada parçacıkların hareketi tam sinüsel değildir. Foton Spektrumu Kritik foton enerjisine kadar süreklidir. Spektrum Infrared'deN hard x-ray bölgesine kadar uzanır.



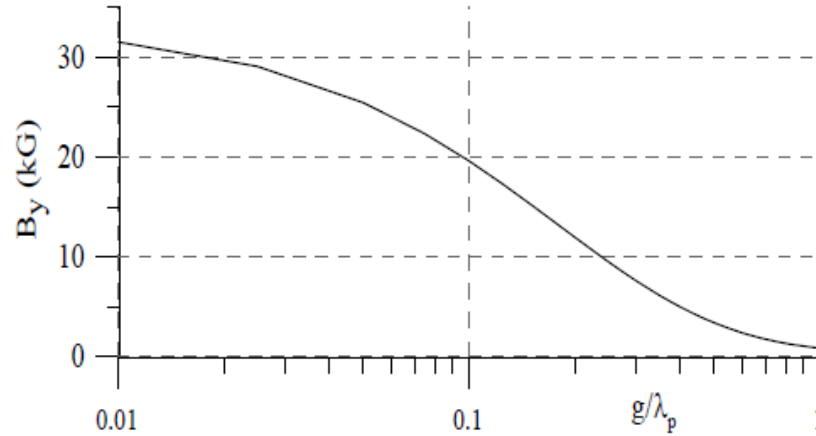
Salıdırıcı Kıırma Parametresi:

$$K = \frac{eB_0\lambda_p}{2\pi mc^2} = 0.934B_0(\text{T})\lambda_p(\text{cm})$$

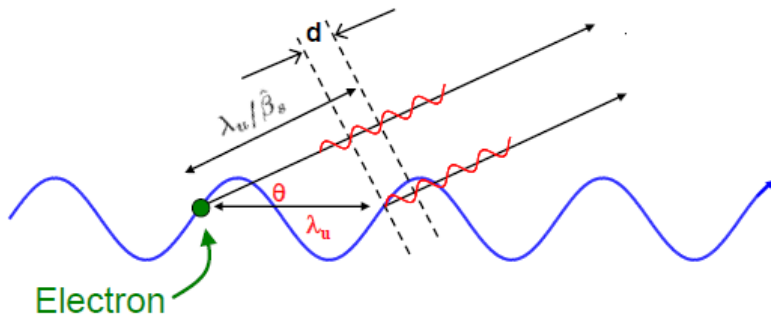


$$B(\text{T}) = 3.3 \exp\left[-\frac{g}{\lambda_p}\left(5.74 - 1.8\frac{g}{\lambda_p}\right)\right]$$

K.Halbach



Salıdırıcıda ışınım bazı özel harmoniklerde üretilir.



Salıdırıcıda dalgaboyu:

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2n\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \theta^2\gamma^2\right)$$

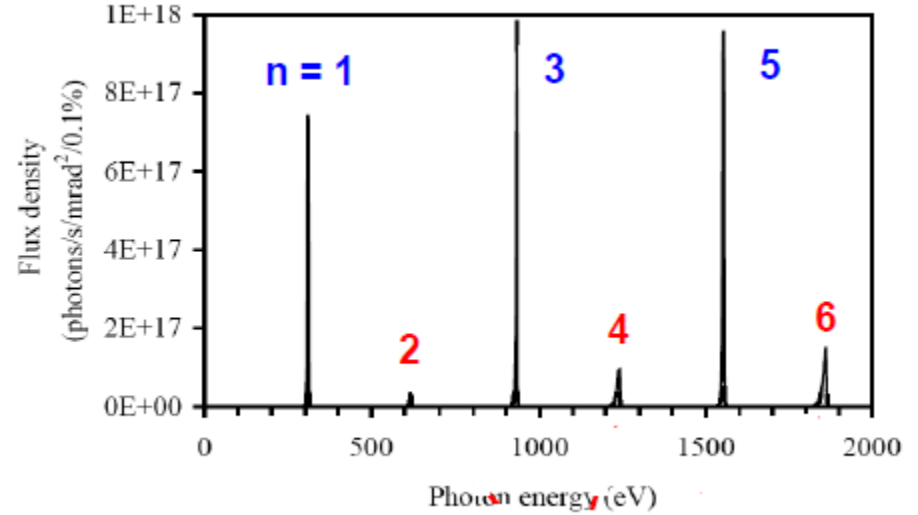
# Eksende Açısal Akı Yoğunluğu

$$\left. \frac{d\dot{N}}{d\Omega} \right|_{\theta=0} = 1.74 \times 10^{14} N^2 E^2 I_b F_n(K)$$

N Periyot Sayısı, E electron enerjisi (GeV), I<sub>b</sub> demet akımı (A)

$$F_n(K) = \frac{n^2 K^2}{(1 + K^2/2)^2} (J_{(n+1)/2}(Y) - J_{(n-1)/2}(Y))^2$$

$$Y = \frac{nK^2}{4(1 + K^2/2)}$$



Parlaklık (Brilliance) 6 boyutlu faz uzayında foton sayısı olarak tanımlanır.

$$B = \frac{\dot{N}}{4\pi^2 \Sigma_x \Sigma_y \Sigma_{x'} \Sigma_{y'}}$$



# Brilliance (Parlaklık)

Parlaklık (photons/sec/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%B.W.) 6 boyutlu faz uzayında foton yoğunluğu olarak tanımlanır.

$$B = \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} n = \frac{d^6 N(x, y, x', y', t, \omega)}{dx dy dx' dy' dt d\omega / \omega}$$

Açısal Akı Yoğunluğu  
photons/sec/mrad<sup>2</sup>/0.1%B.W



$$\frac{d^2 F}{dx' dy'} = \iint B dx dy$$

Toplam Akı  
(photons/sec/0.1%B.W)



$$F = \iiint B dx dy dx' dy'$$

# Kullanılan Benzetim Programları

## Sinkrotron Işınım Kaynağı

- XOP  
(<http://ftp.esrf.eu/pub/scisoft/xop2.3/>)
- SPECTRA  
<http://radiant.harima.riken.go.jp/spectra/>

## Tek Geçişli Hızlandırıcılar (FEL)

- GENESIS
- GINGER
- FELO

## **KAYNAKLAR**

- 1) Sarah Cousineau, Jeff Holmes, Yan Zhang, USPAS, January, 2011
- 2) Introduction to Synchrotron Radiation, Lecture Slides, Jim Clarc, ASTeC
- 3) H. Wiedeamann, The physics of synchrotron Radiation.

**DİNLEDİĞİNİZ İÇİN TEŞEKKÜR EDERİM**