

# Parçacık Kaynakları ve Ön Hızlandırıcılar



*Dr. Özgür Etişken*



*Kırıkkale Üniversitesi ve INFN-LNF*  
*ozgur.etisken@cern.ch*

**Bu ders sunumunun hazırlanmasında aşağıdaki kaynaklardan faydalanılmıştır:**

- A. Wolski, Beam dynamics in high energy particle accelerators
- Y. Lee, Accelerator Physics
- H. Wiedemann, Particle Accelerator Physics
- K. Wille, The Physics of Particle Accelerators
- Philip J. Bryant, The Principles of Circular Accelerators and Storage Rings
- CAS ders notları (F. Tecker, Y. Papaphilippou, B. Holzer, D. Faircloth, R. Scrivens...)
- JUAS ders notları (F. Antoniou, H. Bartosik, ...)
- USPAS ders notları
- UPHDYO ders notları (G. Türemen, ...)
- CERN yaz okulu ders notları
- IPAC proceedings
- Çeşitli doktora tezleri (F. Antoniou, H. Bartosik, C. Bayar, K. Zengin, T. Tydecks...)
- ...



- Bazı parçacık hızlandırıcı merkezlerin anatomisinin incelenmesi, kaynak ve ön hızlandırıcı kavramının anlaşılması
- Bazı parçacık kaynakları
- Siklotron
- Betatron
- Mikrotron
- Sinkrotron:
  - Kullanılan elektromagnetik elemanlar
  - Bazı temel terimler
- Demet iletim hattı (transfer line)
- Demet giriş ve çıkışı (injection and extraction)
- Özet ve tartışma-I

- Dairesel hızlandırıcıların amacı ve farklı dairesel hızlandırıcıların karşılaştırılması;
  - Betatron, mikrotron, siklotron, sinkrotron, ...
- Dairesel hızlandırıcılarda temel parametreler
  - Emittans, sönüm zamanı, tur başına enerji kaybı, ...
- FODO ve diğer örgü türleri
- Dairesel hızlandırıcılarda kabul
  - Enine (lineer olmayan demet dinamiği), boyuna ve mekanik kabul
- Kollektif etkiler
- Daha gerçekçi hesaplamaları için hatalar
- Özet ve tartışma-II

	1. GÜN	2. GÜN	3. GÜN	4. GÜN	5. GÜN
09.30 - 10.15	<b>KAYIT ve AÇILIŞ</b>	Parçacık Kaynakları ve Ön Hızlandırıcılar <b>Özgür ETİŞKEN</b>	Parçacık Madde Etkileşmesi <b>Orhan ÇAKIR</b>	Yüksek Enerji Fizikinde Kullanılan Yazılımlar ve Uygulamaları <b>İlkay TÜRK ÇAKIR</b>	Parçacık Hızlandırıcılarının Genel Kullanım Alanları ve Ar-Ge Çalışmaları <b>Ömer YAVAŞ</b>
10.15 - 11.00	Türkiye'de Hızlandırıcı Dedektör Çalışmalarının Geçmişi ve Gelişimi <b>Ömer YAVAŞ</b>	Doğrusal ve Dairesel Hızlandırıcılar <b>Veli YILDIZ</b>	Parçacık Dedektörlerinin Gelişimi <b>Erkan ÖZCAN</b>	Yüksek Enerji Fizikinde Veri Analiz Yöntemleri-1 <b>Sezen SEKMEN</b>	Hızlandırıcıların Medikal ve Endüstriyel Uygulamaları <b>Taylan YETKİN</b>
11.00 - 11.20	Ara	Ara	Ara	Ara	Ara
11.20 - 12.05	Elektromanyetizmanın Temelleri <b>Orhan ÇAKIR</b>	Hızlandırıcılarda Kullanılan Magnetler ve Tasarımları <b>Ender AKDOĞAN</b>	Dedektör Fizikine Giriş <b>Sertaç ÖZTÜRK</b>	Yüksek Enerji Fizikinde Veri Analiz Yöntemleri-2 <b>Sezen SEKMEN</b>	Dedektörlerin Kullanım Alanları ve Ar-Ge Çalışmaları <b>Burak BİLKİ</b>
12.05 -12.50	Rölativistik Kinematik <b>Aysuhan OZANSOY</b>	Enine Demet Dinamiği <b>Veli YILDIZ</b>	Parçacık Dedektörleri ve Alt Sistemleri <b>İsa DUMANOĞLU</b>	Yüksek Enerji Fizikinde Yapay Zekâ Uygulamaları-1 <b>Serpil YALÇIN KUZU</b>	CERN vb. Merkezlerde Yürütülen Projeler ve Katılım Durumu <b>Serkant Ali ÇETİN</b>
12:50 - 14.15	Öğle Arası	Öğle Arası	Öğle Arası	Öğle Arası	Öğle Arası
14.15 - 15.00	Parçacık Fizikine Giriş <b>Aysuhan OZANSOY</b>	Boyuna Demet Dinamiği <b>Zafer NERGİZ</b>	Dedektör Tasarımı ve Benzetimi <b>Sinan KUDAY</b>	Yüksek Enerji Fizikinde Yapay Zekâ Uygulamaları-2 <b>Serpil YALÇIN KUZU</b>	<b>SINAV</b>
15:00 – 15.45	Parçacık Hızlandırıcılarının Gelişimi <b>Ömer YAVAŞ</b>	Hızlandırıcı Alt Sistemleri-1 <b>Zafer NERGİZ</b>	Dedektör Elektronikleri ve Veri Alımı <b>Bora AKGÜN</b>	Hızlandırıcıya Dayalı Işınım Kaynakları-1 (Sinkrotron Işınımı) <b>Didem KETENOĞLU</b>	Patent ve Faydalı Model <b>Ender AKDOĞAN</b>
15:45 – 16.05	Ara	Ara	Ara	Ara	Ara
16.05 – 16.50	Hızlandırıcı Fizikine Giriş <b>Bora KETENOĞLU</b>	Hızlandırıcı Alt Sistemleri-2 <b>Zafer NERGİZ</b>	Gazlı Dedektörler <b>Özkan ŞAHİN</b>	Hızlandırıcıya Dayalı Işınım Kaynakları-2 (Serbest Elektron Lazeri) <b>Bora KETENOĞLU</b>	Uluslararası Hibe, Burs, Staj ve Eğitim Olanakları: IAEA Projeleri <b>Fatih ÖZMEN</b>
16.50 – 17.35	Parçacık Çarpıştırıcılarına Giriş <b>Ayben KARASU UYSAL</b>	Hızlandırıcılarda Demet Diyagnostiği <b>Salim OĞUR</b>	Yaniletken Dedektörler <b>Cüneyt ÇELİKTAŞ</b>	Işınım Kaynakları Uygulamalarında Kullanılan Teknikler <b>Kemal ŞAFAK</b>	Sınav Sonuçlarının Açıklanması, Katılım Sertifikalarının Verilmesi ve <b>KAPANIŞ</b>



	1. GÜN	2. GÜN	3. GÜN	4. GÜN	5. GÜN
09.30 - 10.15	<b>KAYIT ve AÇILIŞ</b>	Parçacık Kaynakları ve Ön Hızlandırıcılar <b>Özgür ETİŞKEN</b>	Parçacık Madde Etkileşmesi <b>Orhan ÇAKIR</b>	Yüksek Enerji Fiziğinde Kullanılan Yazılımlar ve Uygulamaları <b>İlkay TÜRK ÇAKIR</b>	Parçacık Hızlandırıcılarının Genel Kullanım Alanları ve Ar-Ge Çalışmaları <b>Ömer YAVAŞ</b>
10.15 - 11.00	Türkiye'de Hızlandırıcı Dedektör Çalışmalarının Geçmişi ve Gelişimi <b>Ömer YAVAŞ</b>	Doğrusal ve Dairesel Hızlandırıcılar <b>Veli YILDIZ</b> ! ⚠	Parçacık Dedektörlerinin Gelişimi <b>Erkan ÖZCAN</b>	Yüksek Enerji Fiziğinde Veri Analiz Yöntemleri-1 <b>Sezen SEKMEN</b>	Hızlandırıcıların Medikal ve Endüstriyel Uygulamaları <b>Taylan YETKİN</b>
11.00 - 11.20	Ara	Ara	Ara	Ara	Ara
11.20 - 12.05	Elektromanyetizmanın Temelleri <b>Orhan ÇAKIR</b>	Hızlandırıcılarda Kullanılan Magnetler ve Tasarımları <b>Ender AKDOĞAN</b>	Dedektör Fiziğine Giriş <b>Sertaç ÖZTÜRK</b>	Yüksek Enerji Fiziğinde Veri Analiz Yöntemleri-2 <b>Sezen SEKMEN</b>	Dedektörlerin Kullanım Alanları ve Ar-Ge Çalışmaları <b>Burak BİLKİ</b>
12.05 -12.50	Rölativistik Kinematik <b>Aysuhan OZANSOY</b>	Enine Demet Dinamiği <b>Veli YILDIZ</b> ! ⚠	Parçacık Dedektörleri ve Alt Sistemleri <b>İsa DUMANOĞLU</b>	Yüksek Enerji Fiziğinde Yapay Zekâ Uygulamaları-1 <b>Serpil YALÇIN KUZU</b>	CERN vb. Merkezlerde Yürütülen Projeler ve Katılım Durumu <b>Serkant Ali ÇETİN</b>
12:50 - 14.15	Öğle Arası	Öğle Arası	Öğle Arası	Öğle Arası	Öğle Arası
14.15 - 15.00	Parçacık Fiziğine Giriş <b>Aysuhan OZANSOY</b>	Boyuna Demet Dinamiği <b>Zafer NERGİZ</b> ! ⚠	Dedektör Tasarımı ve Benzetimi <b>Sinan KUDAY</b>	Yüksek Enerji Fiziğinde Yapay Zekâ Uygulamaları-2 <b>Serpil YALÇIN KUZU</b>	<b>SINAV</b> 😊 😜
15:00 – 15.45	Parçacık Hızlandırıcılarının Gelişimi <b>Ömer YAVAŞ</b>	Hızlandırıcı Alt Sistemleri-1 <b>Zafer NERGİZ</b>	Dedektör Elektroniği ve Veri Alımı <b>Bora AKGÜN</b>	Hızlandırıcıya Dayalı Işınım Kaynakları-1 (Sinkrotron Işınımı) <b>Didem KETENOĞLU</b> ! ⚠	Patent ve Faydalı Model <b>Ender AKDOĞAN</b>
15:45 – 16.05	Ara	Ara	Ara	Ara	Ara
16.05 – 16.50	Hızlandırıcı Fiziğine Giriş <b>Bora KETENOĞLU</b> ✓	Hızlandırıcı Alt Sistemleri-2 <b>Zafer NERGİZ</b>	Gazlı Dedektörler <b>Özkan ŞAHİN</b>	Hızlandırıcıya Dayalı Işınım Kaynakları-2 (Serbest Elektron Lazeri) <b>Bora KETENOĞLU</b> ! ⚠	Uluslararası Hibe, Burs, Staj ve Eğitim Olanakları: IAEA Projeleri <b>Fatih ÖZMEN</b>
16.50 – 17.35	Parçacık Çarpıştırıcılarına Giriş <b>Ayben KARASU UYSAL</b> ✓	Hızlandırıcılarda Demet Diyagnostiği <b>Salim OĞUR</b>	Yaniletken Dedektörler <b>Cüneyt ÇELİKTAŞ</b>	Işınım Kaynakları Uygulamalarında Kullanılan Teknikler <b>Kemal ŞAFAK</b>	Sınav Sonuçlarının Açıklanması, Katılım Sertifikalarının Verilmesi ve <b>KAPANIŞ</b> 🎉 🎊 🎁 🥳

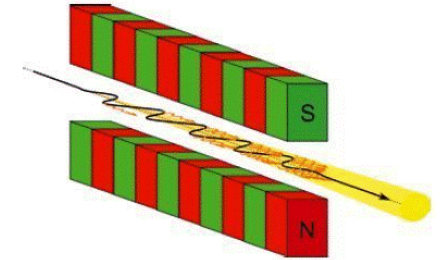
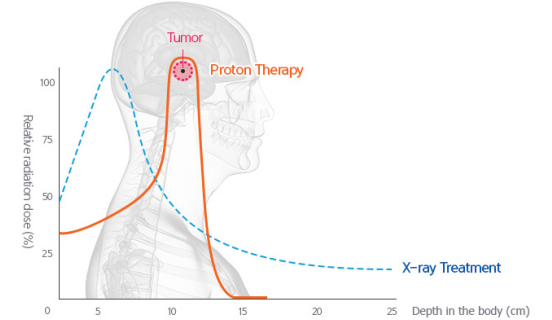
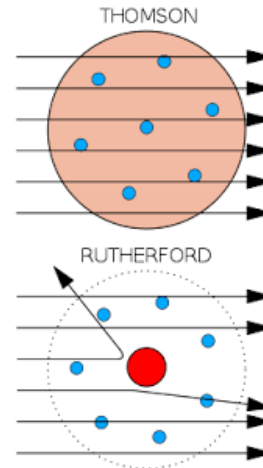
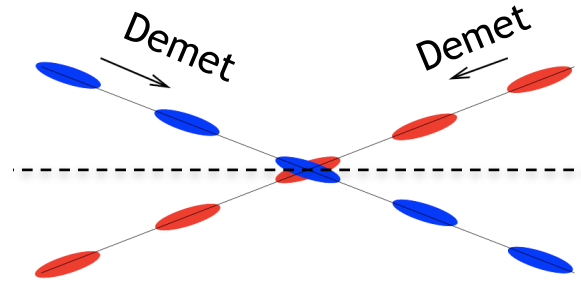
- **Kaynak ve ön hızlandırıcılar** ifadesi bize ne anlatmalıdır? Çeşitli hızlandırıcı merkezlerinin anatomisini inceleyerek anlayama çalışalım.

Sabit hedef deneyleri:

Işınım kaynakları:

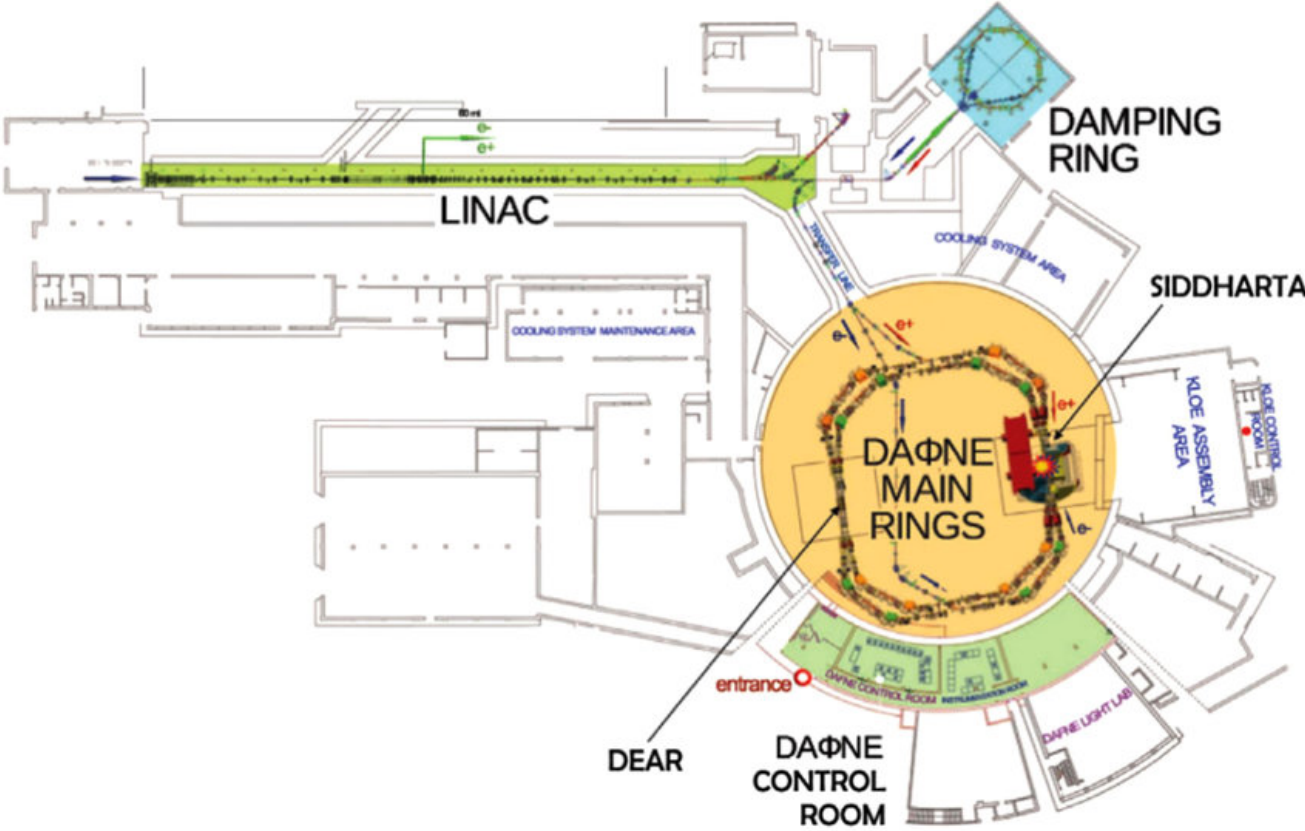
Çarpıştırıcılar:

Hızlandırıcıların uygulamaları:



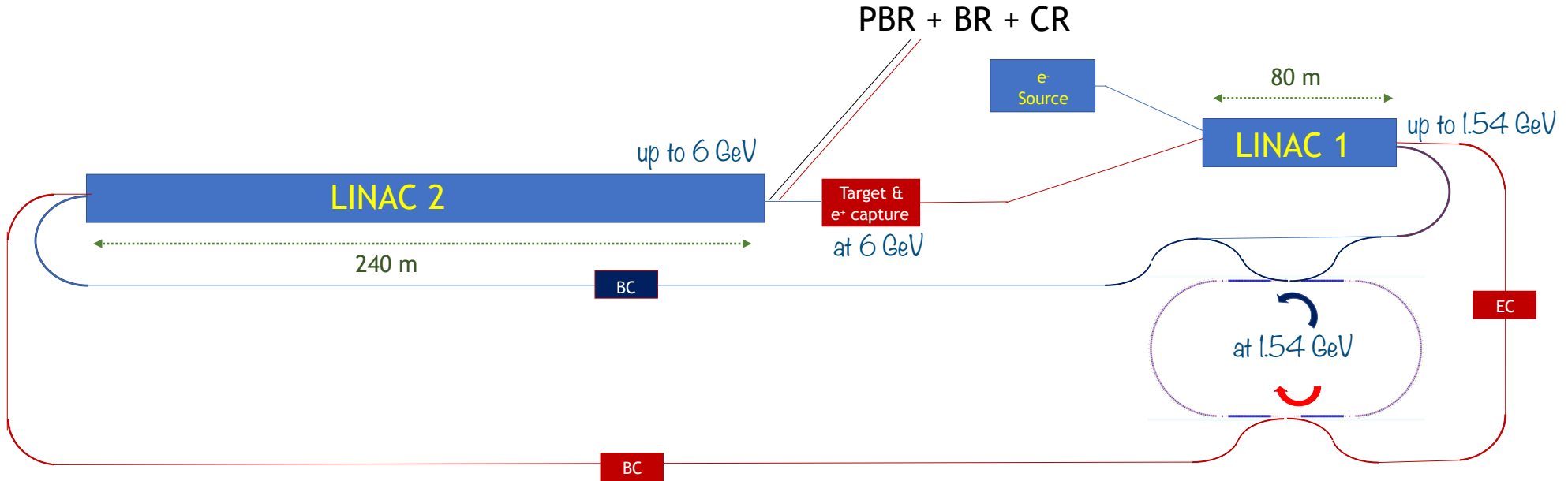
Rende Steerenberg, CERN

- **Kaynak ve ön hızlandırıcılar** ifadesi bize ne anlatmalıdır? Çeşitli **hızlandırıcı** merkezlerinin **anatomisini** inceleyerek anlayama çalışalım.



- Kaynak (triode); 10 A elektron @ 120 KV
- ~60 m linak, FODO
- Pozitron üretimi @ 250 MeV
- 550 MeV,  $e^+$
- 800 MeV,  $e^-$
- 32.5 m biriktirme (accumulator) halkası
- İki ana halka, 100 m

- **Kaynak ve ön hızlandırıcılar** ifadesi bize ne anlatmalıdır? Çeşitli hızlandırıcı merkezlerinin anatomisini inceleyerek anlayama çalışalım.



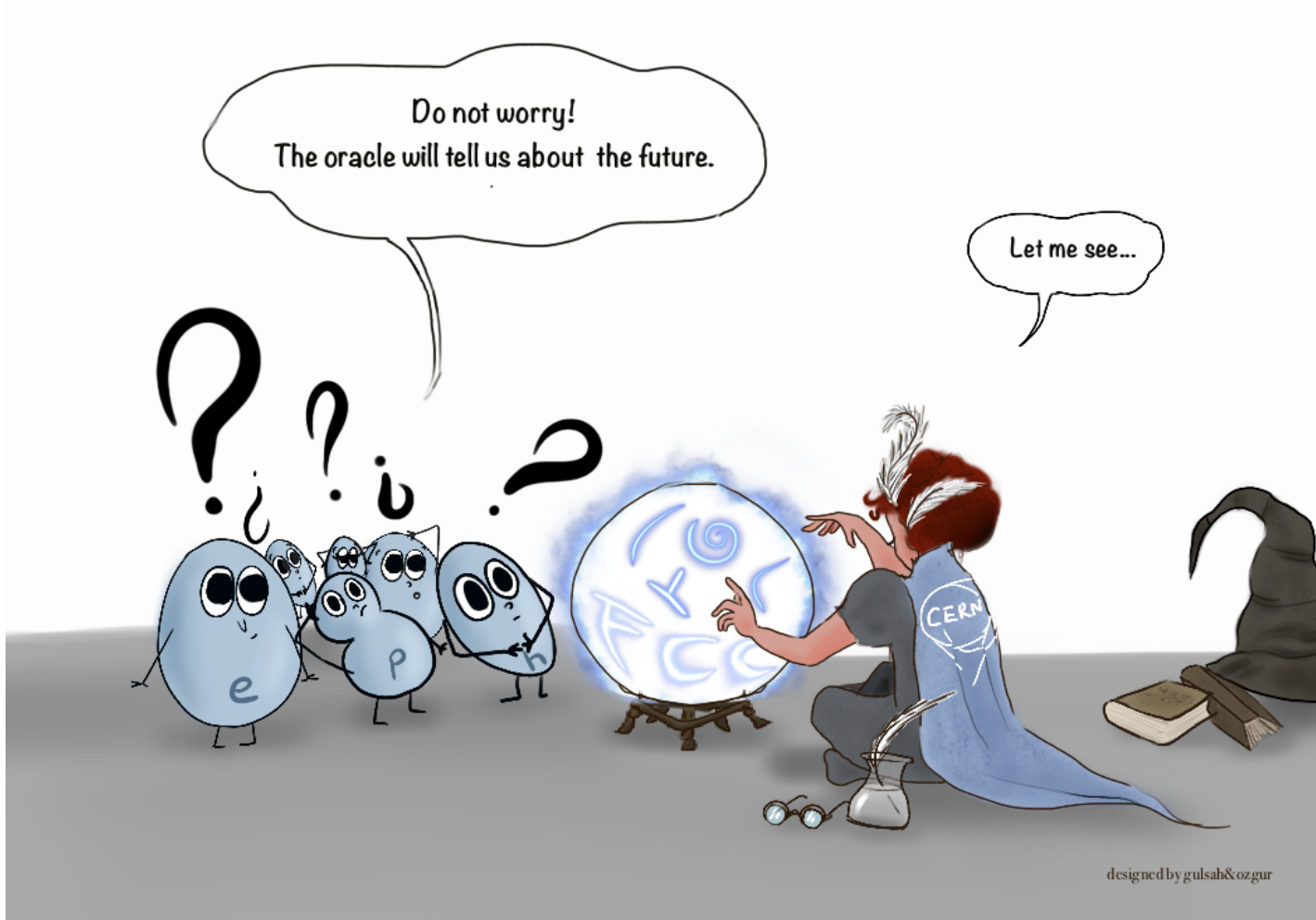
Under discussion and revision!

C. Milardi, et. al., FCC-ee Injector Design/CHART Coordination meeting, 2021

P. Craievich et al, FCC Week 2022

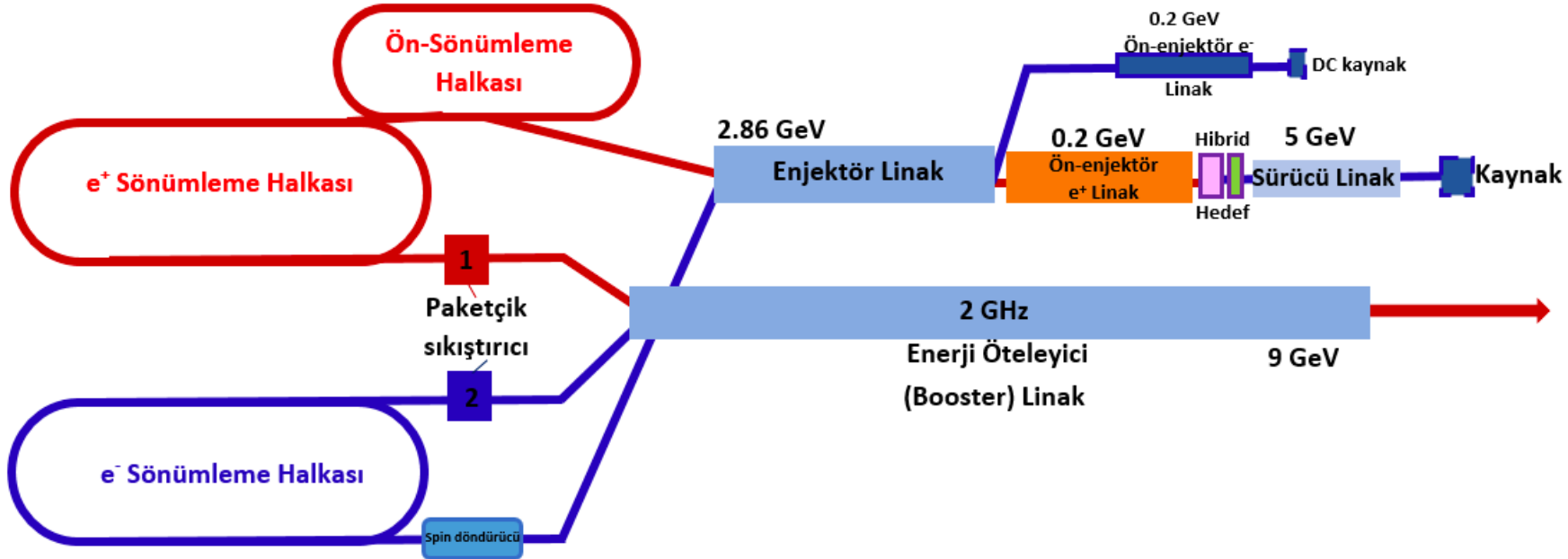


- Gelecek FCC'yi (Future Circular Collider) çağırıyor olabilir...



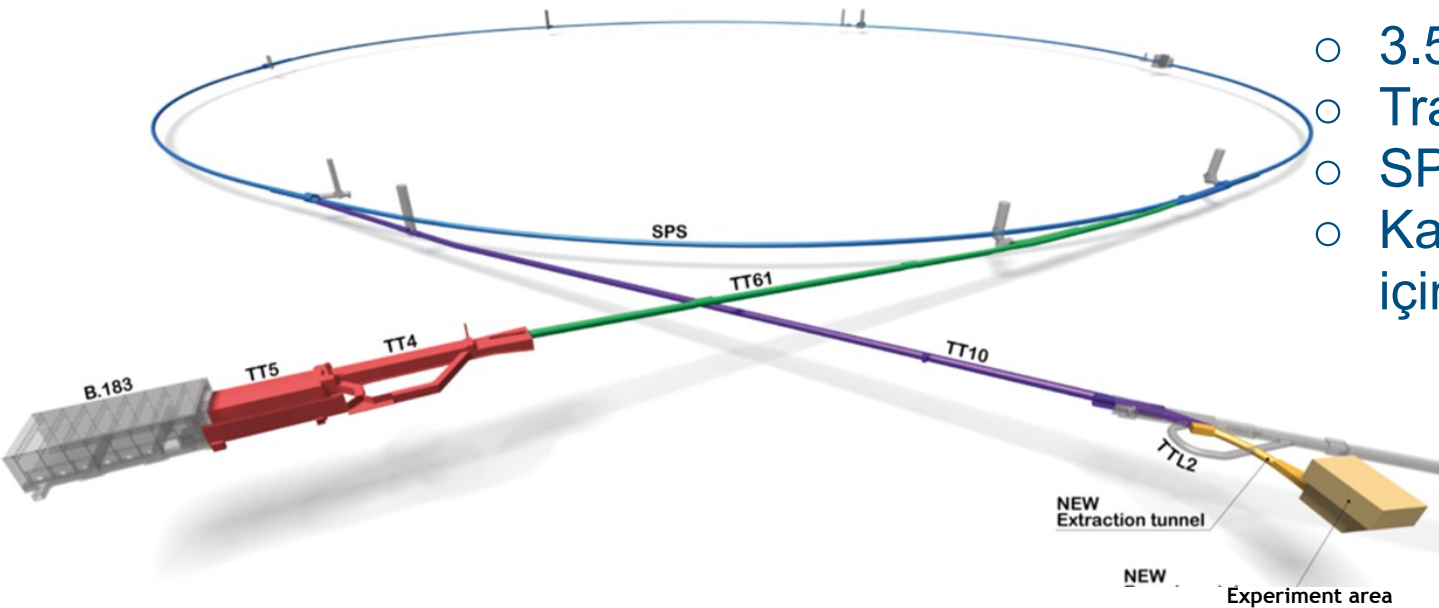


- **Kaynak ve ön hızlandırıcılar** ifadesi bize ne anlatmalıdır? Çeşitli **hızlandırıcı** merkezlerinin **anatomisini** inceleyerek anlayama çalışalım.



C. Bayar, PhD thesis, 2019

- **Kaynak ve ön hızlandırıcılar** ifadesi bize ne anlatmalıdır? Çeşitli **hızlandırıcı merkezlerinin anatomisini** inceleyerek anlayama çalışalım.

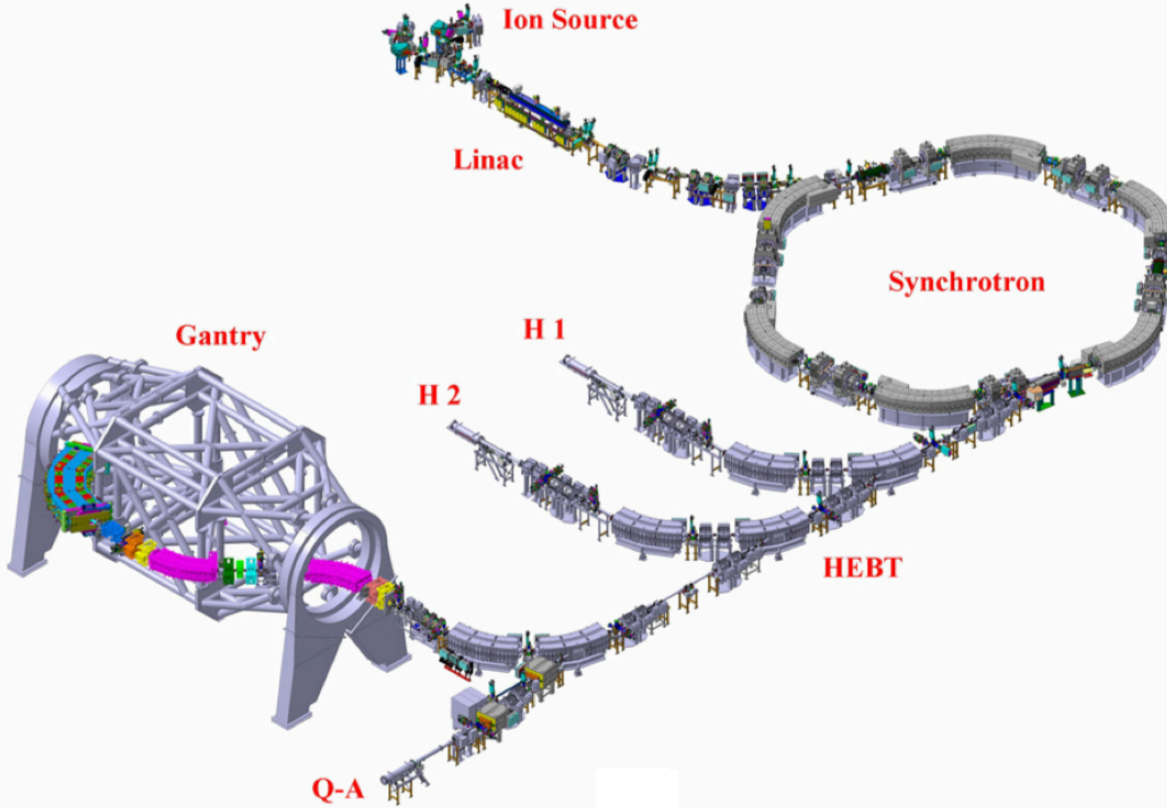


- 3.5 GeV linak
- Transfer hattı
- SPS, 16 GeV
- Karanlık madde araştırmaları için deney alanı

eSPS, CDR, 2020

LDMX

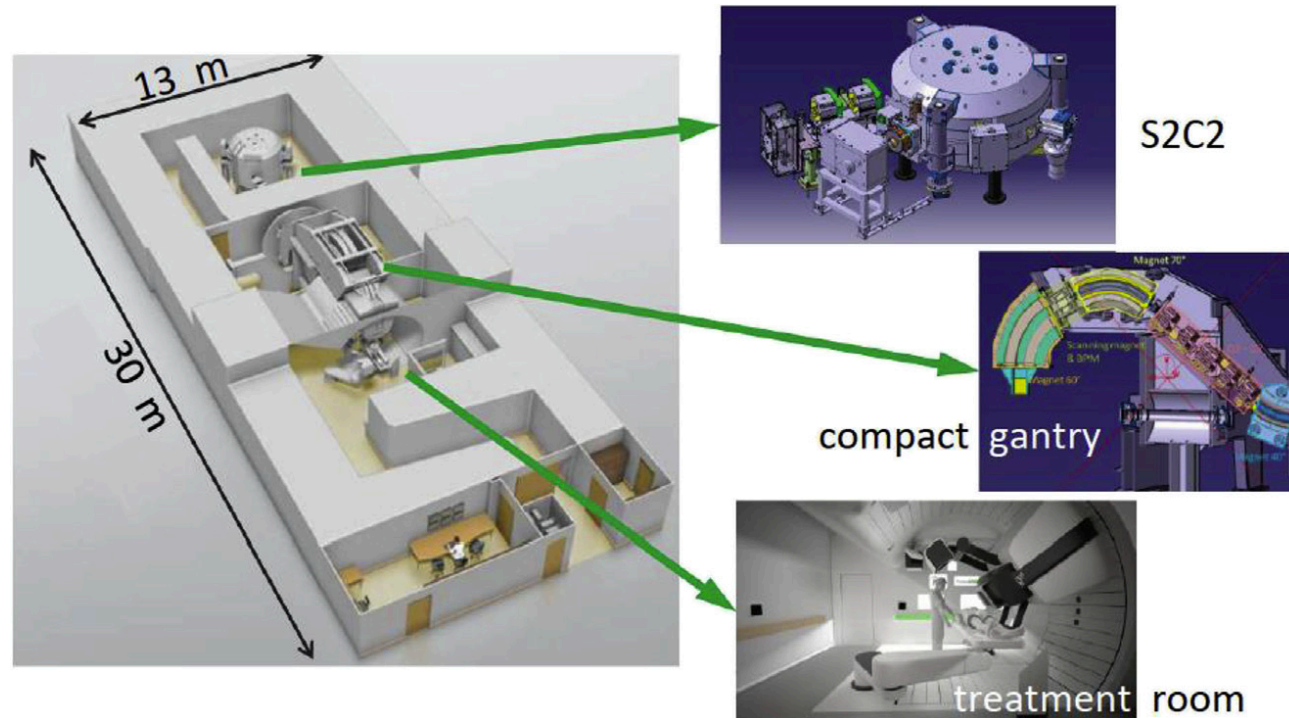
- **Kaynak ve ön hızlandırıcılar** ifadesi bize ne anlatmalıdır? Çeşitli **hızlandırıcı** merkezlerinin **anatomisini** inceleyerek anlayama çalışalım.



Heidelberg Ion Therapy Centre (HIT)

- Kaynaklar ( $p^+$  ve C)
- Linak
- Sinkrotron (221 MeV, p ve 430 MeV/u)
- Transfer hatları
- Tedavi odaları

- **Kaynak ve ön hızlandırıcılar** ifadesi bize ne anlatmalıdır? Çeşitli **hızlandırıcı merkezlerinin anatomisini** inceleyerek anlayama çalışalım.



- Siklotron (230 MeV)
- Çıkış&giriş ve transfer hattı
- Tedavi odası

Proteus®ONE 

- **Kaynak ve ön hızlandırıcılar** ifadesi bize ne anlatmalıdır? Çeşitli hızlandırıcı merkezlerinin **anatomisini** inceleyerek anlayama çalışalım.

- **Kaynak** (particle source such as  $e^+$ ,  $e^-$ ,  $p^+$ , C, etc.)
- **Doğrusal** hızlandırıcılar (linac),
- **Siklotron** (cyclotron)
- **Sinktrottron** (synchrotron)
  - \* Sönümlenme halkası (damping ring)
  - \* Ön-sönümlenme halkası (pre-damping ring)
  - \* Enerji öteleyici halkası (booster ring)
  - \* Ön-enerji öteleyici halkası (pre-booster ring)
  - \* Biriktirme halkası (accumulator ring)
  - \* Çarpıştırıcılar (colliders), depolama halkası (storage ring)
- Demet **iletim hattı** (transfer line)
  - \* Enerji sıkıştırıcı (energy compressor)
  - \* Paketçik sıkıştırıcı (bunch compressor)
  - \* Spin döndürücü (spin rotator)
  - \* ...
- Demet **giriş ve çıkışı** (injection and extraction)

- **Kaynak ve ön hızlandırıcılar** ifadesi bize ne anlatmalıdır? Çeşitli hızlandırıcı merkezlerinin anatomisini inceleyerek anlayama çalışalım.

- **Kaynak** (particle source such as  $e^+$ ,  $e^-$ ,  $p^+$ , C, etc.)
- **Doğrusal** hızlandırıcılar (linac), Dr. Veli Yıldız, Çarşamba-10:15
- **Siklotron** (cyclotron)
- **Sinktrottron** (synchrotron)
  - \* Sönümlenme halkası (damping ring)
  - \* Ön-sönümlenme halkası (pre-damping ring)
  - \* Enerji öteleyici halkası (booster ring)
  - \* Ön-enerji öteleyici halkası (pre-booster ring)
  - \* Biriktirme halkası (accumulator ring)
  - \* Çarpıştırıcılar (colliders), depolama halkası (storage ring)
- Demet **iletim hattı** (transfer line)
  - \* Enerji sıkıştırıcı (energy compressor)
  - \* Paketçik sıkıştırıcı (bunch compressor)
  - \* Spin döndürücü (spin rotator)
  - \* ...
- Demet **giriş ve çıkışı** (injection and extraction)

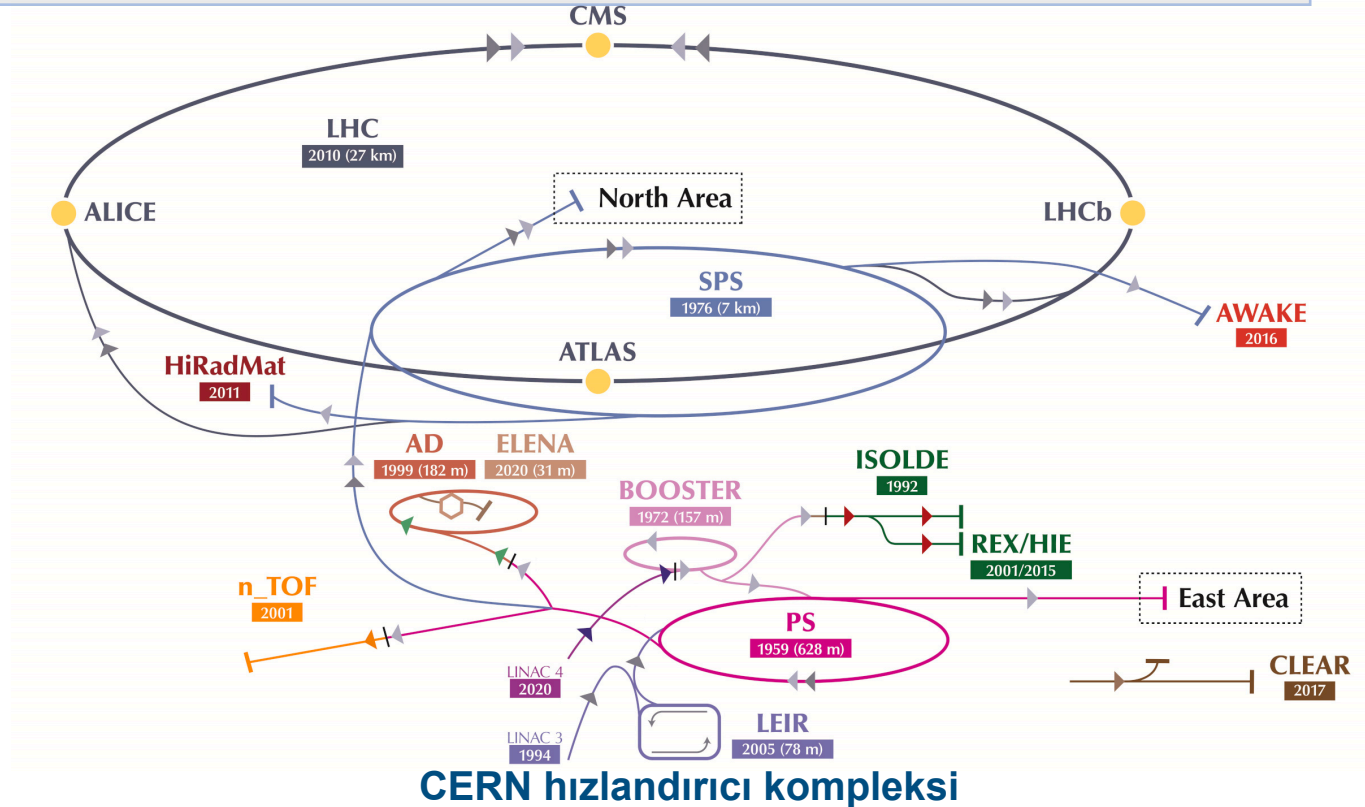


# Parçacık kaynağı

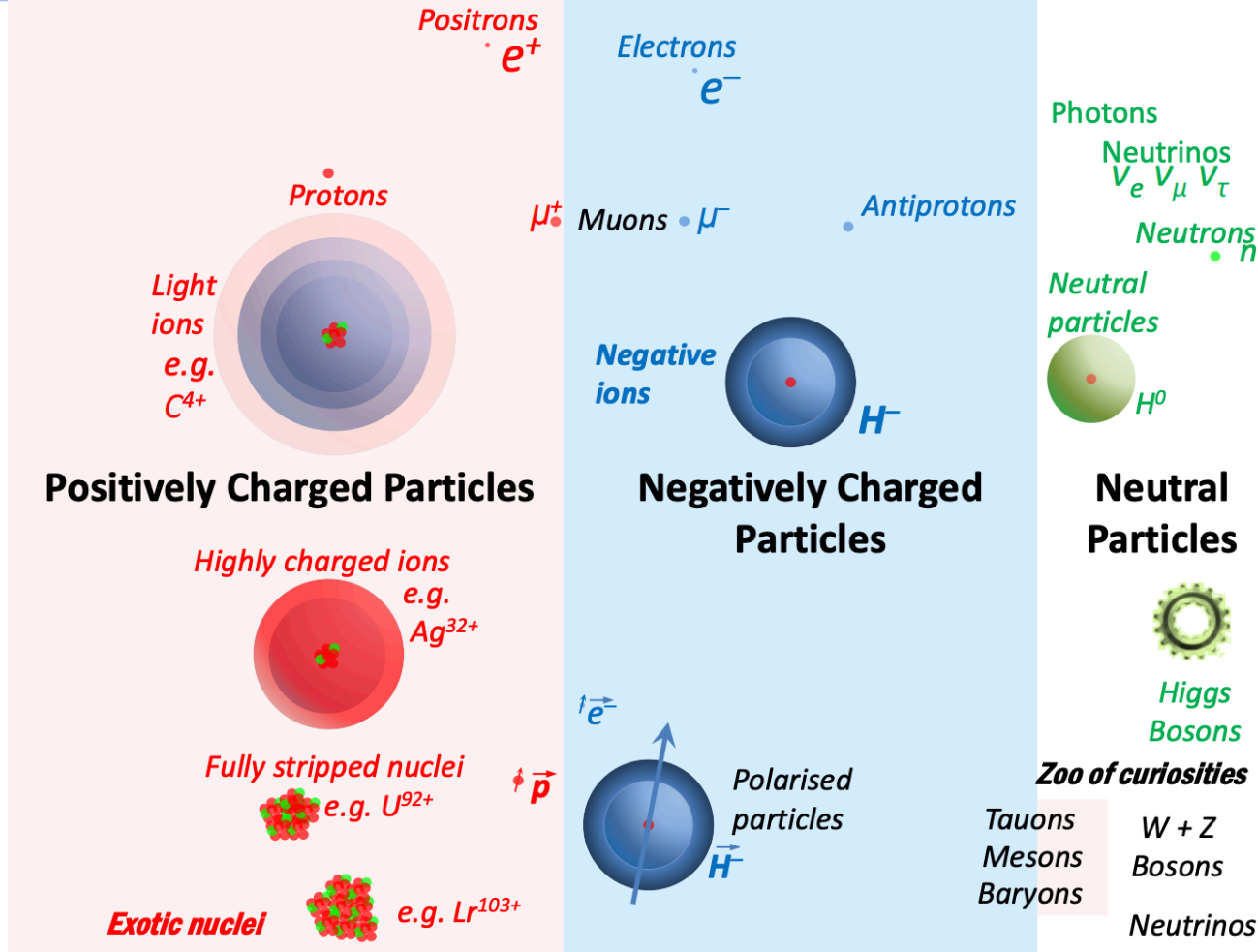
- Hızlandırıcının esas görevi içerisinde parçacık kaynağının önemi:
  - Parçacığın geldiği (ya da gelmediği) yer,
  - İstenen parçacık türünün sağlandığı yer,
  - İstenen parçacık yoğunluğu/enerjisi/şekli/yapısının sağlandığı yer.

## Parçacık kaynağı;

Parçacık hızlandırıcısı içinde elektrik ve manyetik alanlar yardımıyla yönlendirdiğimiz ve hızlandırdığımız yüklü parçacık demetini oluşturan yapıdır.



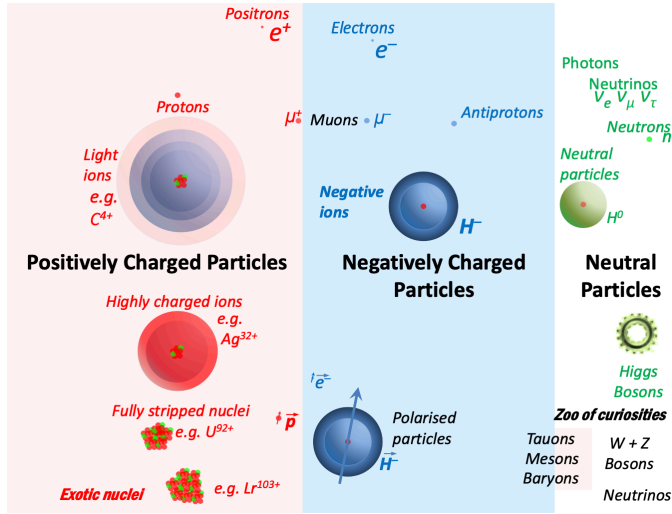
## ○ Ne tür bir parçacık istiyoruz?



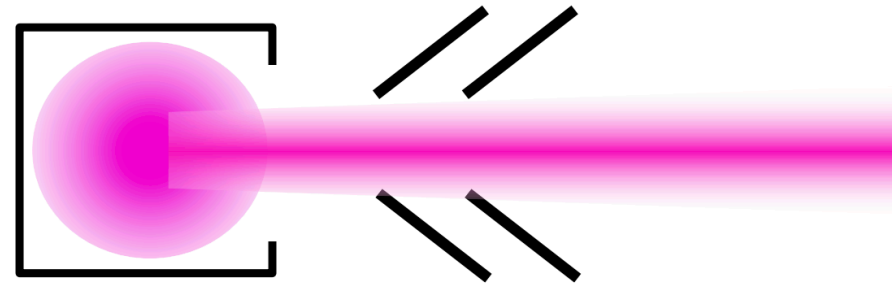
Dan Faircloth, CAS 2016



## ○ Ne tür bir parçacık istiyoruz?



Parçacık kaynakları temelde iki ana unsurdan oluşur:



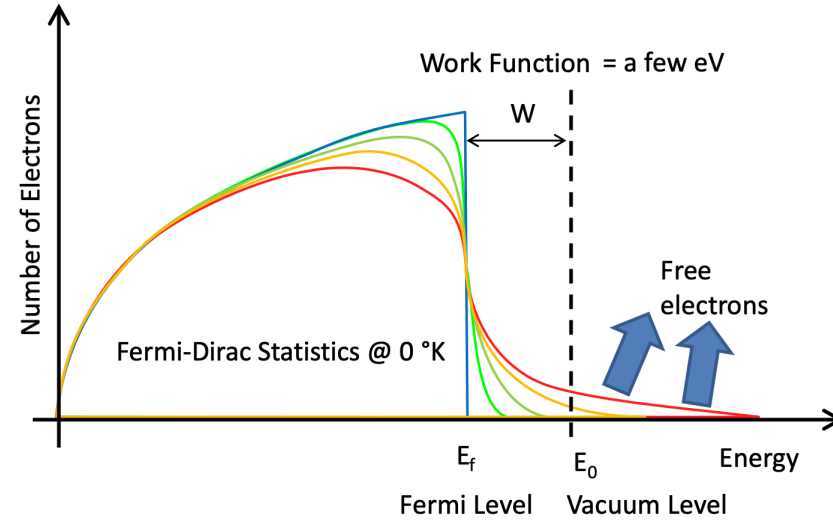
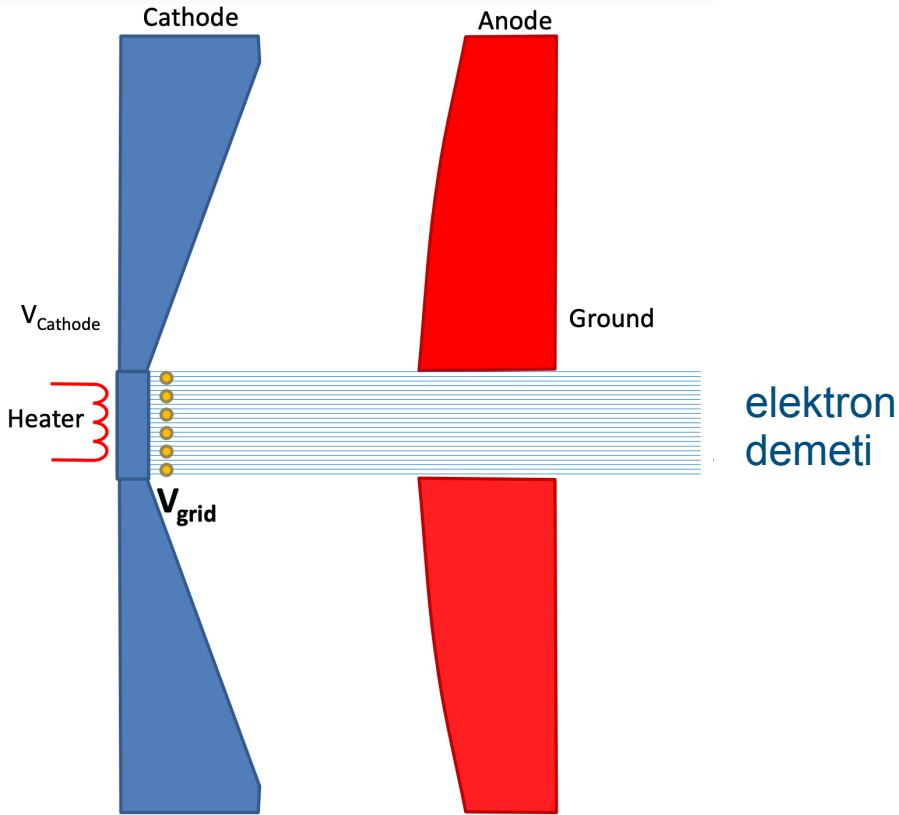
Parçacıkları  
oluşturabileceğiniz  
bir malzeme

+

Demeti oluşturup  
hızlandırıp çıkış  
sistemi

Dan Faircloth, CAS 2016

- **Termiyonik yayım:** Malzeme içerisindeki elektronlar, malzemeden kurtulması için gereken enerjiye kadar ısıtılır.



$$J = A_G T^2 e^{\frac{-W}{kT}}$$

**İyi bir elektron yayımı için:**

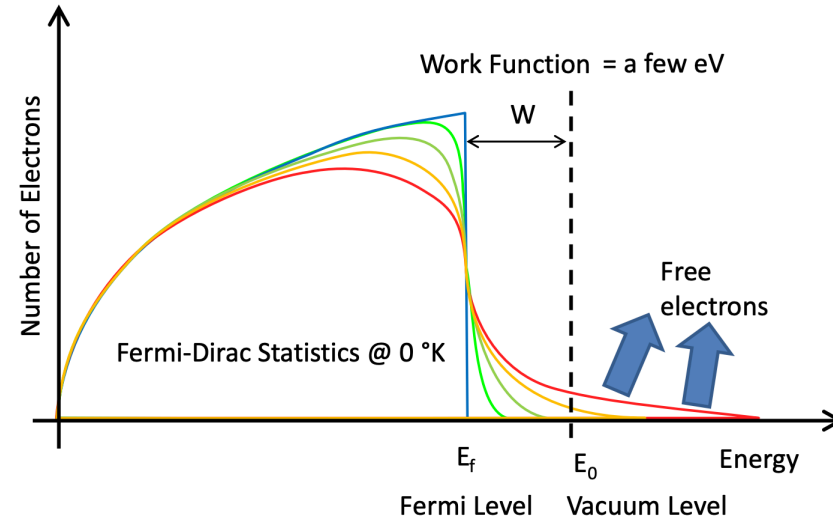
- küçük  $W$  fonksiyonu,
- Yüksek sıcaklık

Dan Faircloth, CAS 2016

- **Termiyonik yayım:** Malzeme içerisindeki elektronlar, malzemeden kurtulması için gereken enerjiye kadar ısıtılır.

Metalde atom başına bir veya iki elektron serbest haldedir (elektron denizi). Bu elektronların hızları bir istatistiksel dağılımı takip eder. Bazı durumlarda elektron, geri çekilemeden metalden çıkmak için yeterli hıza sahip olur.

Elektronu malzemeden koparmak için gereken minimum enerjiye iş fonksiyonu denir. İş fonksiyonu malzemenin karakteristik özelliğidir ve bir çok metal için bir-kaç elektron-volt mertebesindedir.



$$J = A_G T^2 e^{\frac{-W}{kT}}$$

**İyi bir elektron yayımı için:**

- küçük W fonksiyonu,
- Yüksek sıcaklık

Dan Faircloth, CAS 2016

- **Termiyonik yayım:** Malzeme içerisindeki elektronlar, malzemedan kurtulması için gereken enerjiye kadar ısıtılır.

- İletken malzemeler, Fermi-Dirac enerji dağılımına uyan serbest elektronlar içerir.
- Bir malzeme ısıtıldığında, elektronların enerji dağılımı sıfır sıcaklıktaki Fermi dağılımından kayar.
- Bu nedenle yüksek sıcaklıklarda malzemenin çevresinde elektron bulutu oluşur.
- Akım yoğunluğu mevcut elektronları ve enerjilerini entegre ederek bulunabilir.

## Richardson–Dushman denklemi

$$J = A_G T^2 e^{-\frac{W}{kT}}$$

İş fonksiyonu

Akım yoğunluğu

Sabit

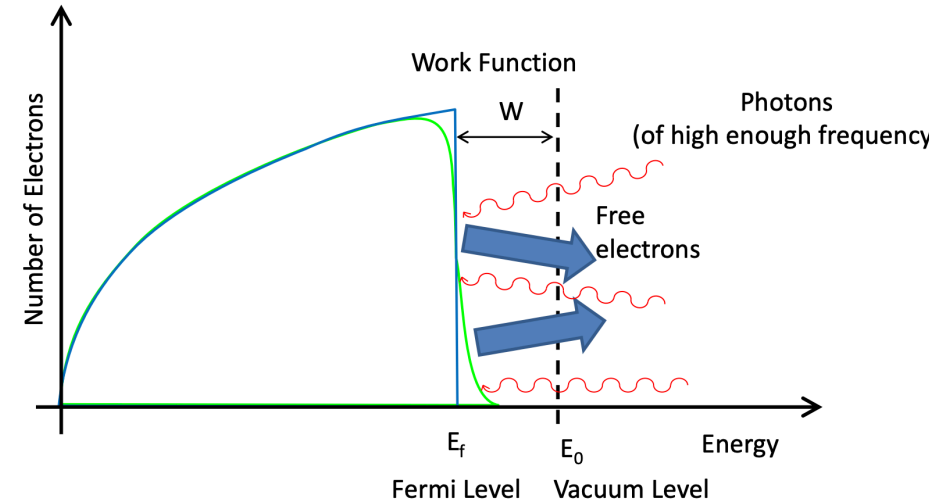
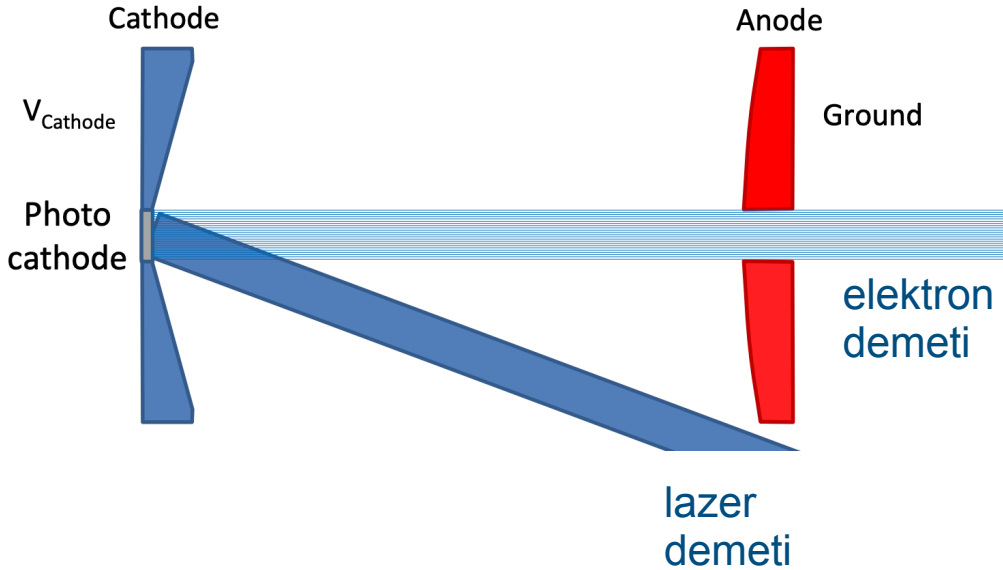
Sıcaklık

Boltzman sabiti

## İyi bir elektron yayımı için:

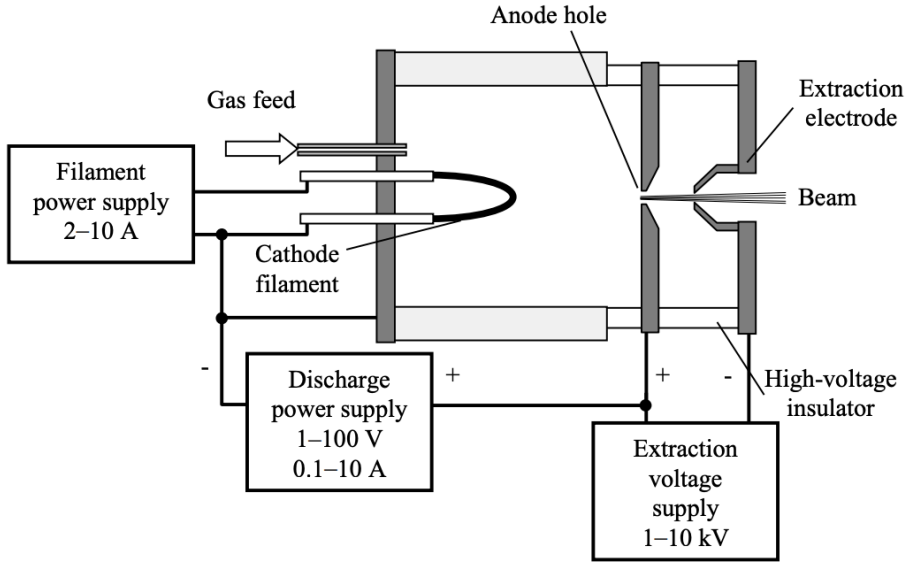
- küçük  $W$  fonksiyonu,
- Yüksek sıcaklık

- **Foto-yayım:** Malzeme içerisindeki elektronların enerjisi foton soğurumuyla artırılır (foto-elektrik etki).



$$QE = \frac{N_e}{N_p}$$

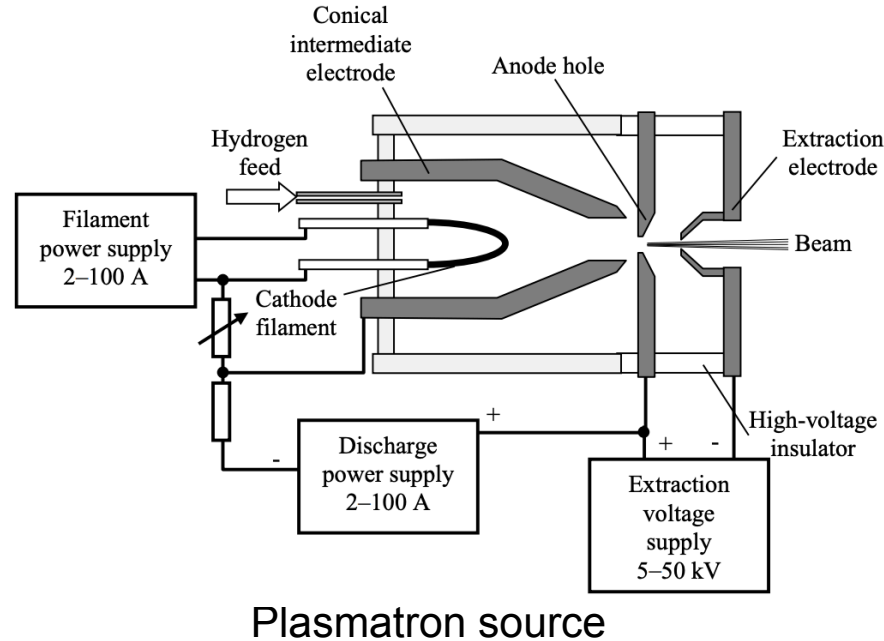
- Hızlandırıcılarda kullanılan çeşitli iyon kaynakları vardır. Burada bir kaç örnek göstereceğiz.
- İyon, elektron sayısı proton sayısına eşit olmayan atom ya da moleküldür. Böylece net bir negatif veya pozitif yükü olur.
- İyon kaynakları temelde, plazma üretici ve çıkış sisteminden oluşur.
- Plazma üreticisi yeterli iyonu çıkış sistemine göndermelidir.
- Çıkış sistemi, plazmadan gelen iyonları, istenmeyen iyon, elektron ya da nötr parçacıkları ayırarak doğru iyonları istenen yapı ve açıda hızlandırıcının sonraki aşamasına aktarmalıdır.



Electron bombardment source

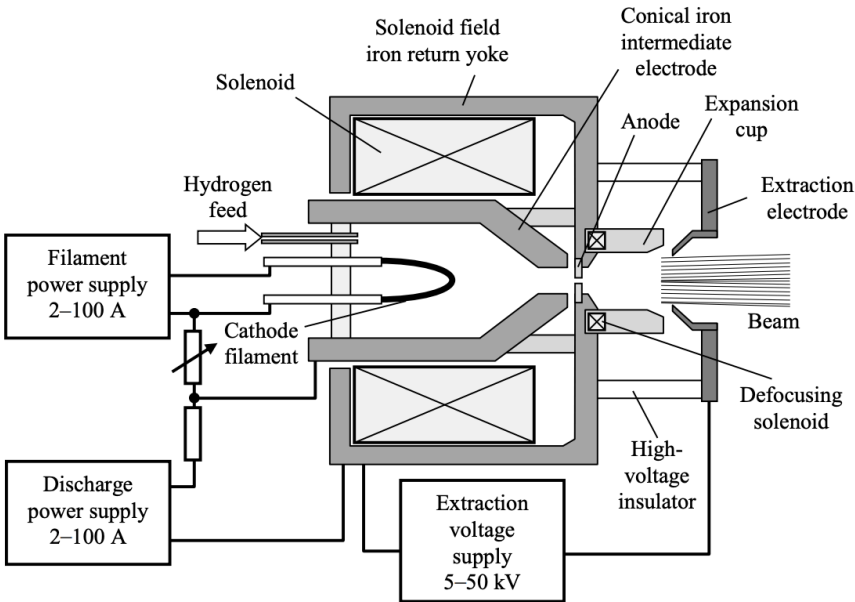
- Katot, üzerinden akım geçirilerek ısıtılır ve termiyonik olarak elektron yayar.
- Bu elektronlar hızlandırılır ve etki ile gazı iyonlaştırır.
- Anodun içinde küçük bir delik ve bunun karşısında bir çıkış elektrodu bulunur.
- Çıkış elektroduna negatif bir yüksek voltaj uygulanır.
- Pozitif iyonlar kaynaktan çıkarılır.
- Yaklaşık 1 mA demet akımlar üretilebilir.
- Basit ve ucuz bir yol olsa da oluşturulan akım yüksek enerji hızlandırıcıları için çok küçüktür.

- Hızlandırıcılarda kullanılan çeşitli iyon kaynakları vardır. Burada bir kaç örnek göstereceğiz.
- İyon, elektron sayısı proton sayısına eşit olmayan atom ya da moleküldür. Böylece net bir negatif veya pozitif yükü olur.
- İyon kaynakları temelde, plazma üretici ve çıkış sisteminden oluşur.
- Plazma üreticisi yeterli iyonu çıkış sistemine göndermelidir.
- Çıkış sistemi, plazmadan gelen iyonları, istenmeyen iyon, elektron ya da nötr parçacıkları ayırarak doğru iyonları istenen yapı ve açıda hızlandırıcının sonraki aşamasına aktarmalıdır.



- Elektron bombardımanı kaynağının geliştirilmiş halidir.
- Demet akımını artırmak için, şekil'de gösterildiği gibi, konik şekilli bir ara elektrot yerleştirilir.
- Ara elektrodun amacı, plazmayı anot çıkarma deliğinin yakınındaki daha yüksek yoğunluklu bir bölgeye "yönlendirmektir".
- Çıkış bölgesinin yakınındaki daha yüksek plazma yoğunluğu, daha fazla iyonun çıkarılmasını sağlar.

- Hızlandırıcılarda kullanılan çeşitli iyon kaynakları vardır. Burada bir kaç örnek göstereceğiz.
- İyon, elektron sayısı proton sayısına eşit olmayan atom ya da moleküldür. Böylece net bir negatif veya pozitif yükü olur.
- İyon kaynakları temelde, plazma üretici ve çıkış sisteminden oluşur.
- Plazma üreticisi yeterli iyonu çıkış sistemine göndermelidir.
- Çıkış sistemi, plazmadan gelen iyonları, istenmeyen iyon, elektron ya da nötr parçacıkları ayırarak doğru iyonları istenen yapı ve açıda hızlandırıcının sonraki aşamasına aktarmalıdır.

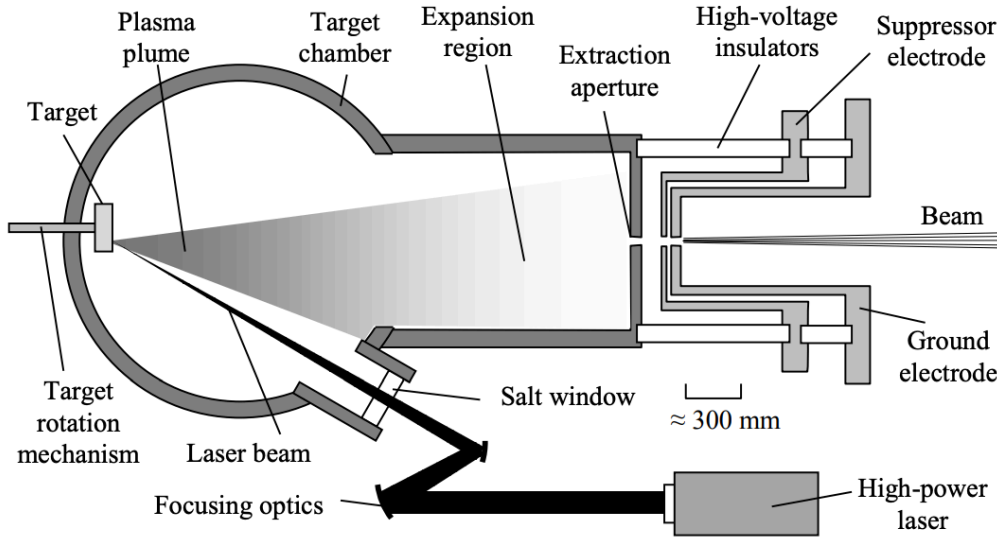


Duoplasmatron source

- Etkin olarak bir plazmatron ile aynıdır ancak konik ara elektrotun yapısı farklıdır.
- Plazma çeperi bir solenoidin içine yerleşiktir.
- Konik ara elektrot, manyetik alan çizgilerini sıkıştırır ve bunları anodun hemen önünde yoğunlaştırır.
- Manyetik alan çizgilerinin sıkışması ve yönlendirme etkisi, çıkış deliğinin hemen önünde çok yüksek bir plazma yoğunluğu oluşturur.
- Bu, iyon yoğunluğunu büyük ölçüde artırır ve 1,5 A'ya kadar çok yüksek pozitif iyon akımlarının çıkarılmasına izin verir.
- CERN, LINAC2'de uzun yıllar bir duoplasmatron kullandı.



- Hızlandırıcılarda kullanılan çeşitli iyon kaynakları vardır. Burada bir kaç örnek göstereceğiz.
- İyon, elektron sayısı proton sayısına eşit olmayan atom ya da moleküldür. Böylece net bir negatif veya pozitif yükü olur.
- İyon kaynakları temelde, plazma üretici ve çıkış sisteminden oluşur.
- Plazma üreticisi yeterli iyonu çıkış sistemine göndermelidir.
- Çıkış sistemi, plazmadan gelen iyonları, istenmeyen iyon, elektron ya da nötr parçacıkları ayırarak doğru iyonları istenen yapı ve açıda hızlandırıcının sonraki aşamasına aktarmalıdır.

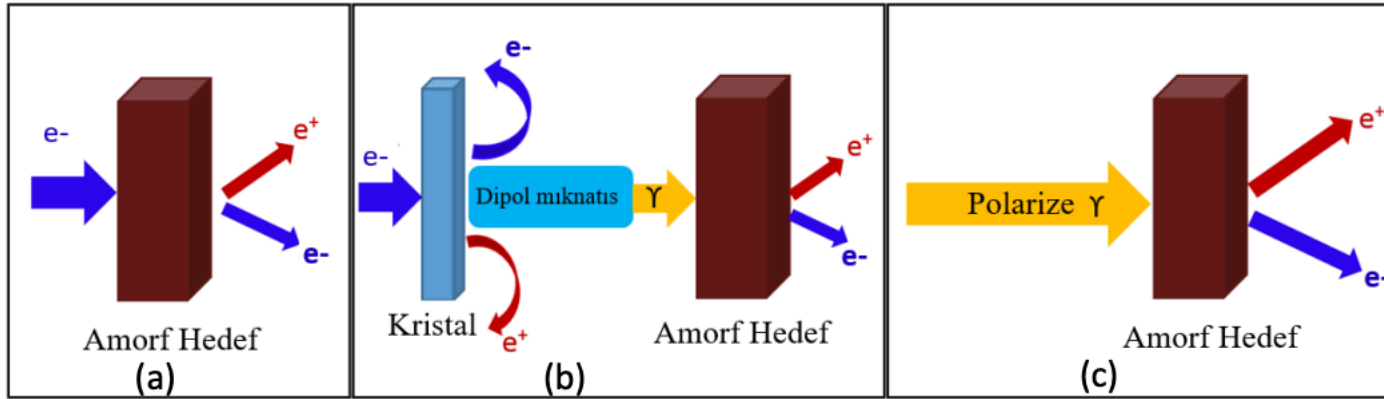


Laser ion source

- Lazer iyon kaynakları, malzemeyi iyonize etmek için güçlü bir lazer kullanır.
- Lazer ışını hedefe çarptığında önce onu buharlaştırır, sonra plazmaya iyonlaştırır.
- Yoğun plazma, çıkış açıklığına ulaşana kadar genişleme bölgesi boyunca yayılan bir plazma bulutuna erişir.
- Hedef çeperi, demetin topraklanmış bir elektrot tarafından çıkarılmasına izin vermek için yüksek voltajlı bir platform üzerine oturur.

- Dolaylı parçacık kaynaklarına bir örnek:

Pozitron üretmek için üç temel yöntem:



- Birinci yöntem, elektronları Bremsstrahlung'dan üretilen fotonlar vasıtasıyla polarize edilmemiş pozitron demetleri üretmek için amorf bir hedefe çarptırmak.
- İkinci yöntem, bir kristal hedefi ve ardından amorf bir hedefi içeren bir hibrid hedefi kullanmak.
- Üçüncü yöntem ise, polarize pozitron üreten amorf bir hedef üzerine polarize gama ışınları göndermektir

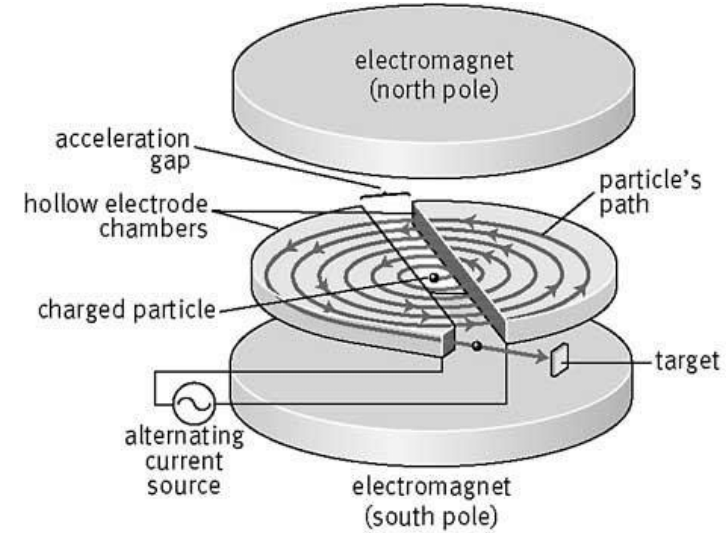
Cafer Bayar, PhD Thesis

- **Hızlandırıcıların gelişimine** bakarken, direct-voltage accelerator, Cockroft-walton cascade generator, the Marx generator, Van de Graff accelerator, linear accelerator gibi hızlandırıcıları gördük.
- **Lineer hızlandırıcılar** ile yüksek enerjilere çıkmak mümkün olsa da bir yandan **maliyet** yükselmekte. Bu nedenle parçacıkları **çembersel** bir yörüngede dolandırmak ve aynı hızlandırma elemanını **tekrar tekrar** kullanmak mantıklıdır.
- Bu prensip ile üretilen tarihteki **ilk** hızlandırıcı **siklotron**dur.

Güzel bir animasyon ve Lawrence'ın anlatımıyla video:

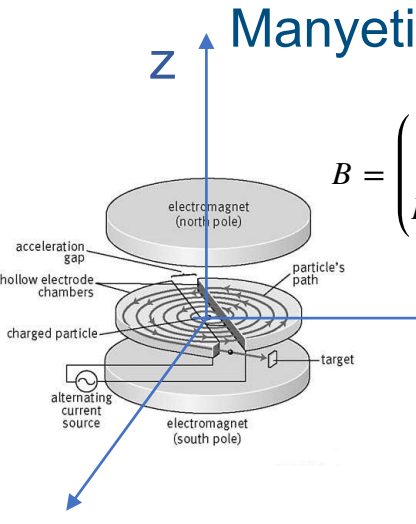
<https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Meca/Charges/cyclotron.php>

<https://www.youtube.com/watch?v=cutKuFxeXmQ>



- **Lawrence, 1929**: klasik siklotron (the fixed-frequency cyclotron) teklifi
- **1931, Lawrence** ve öğrencisi **Livingston** hidrojen iyonlarını hızlandırdı (**80 keV** - 1931)
- **1932: 1.25 MeV – 1940: 20 MeV** (E.O. Lawrence, M.S. Livingston)
- 1930'ların sonlarına doğru proton için **25 MeV**'lik bir üst sınır söz konusuysen, bugün çok daha yüksek enerjilere çıkmıştır (özellikle synchrotron-cyclotron ile birlikte.)
- Siklotronun ilk **medikal uygulamaları** nötron ile birlikte **1940**'larda başladı.

Manyetik alan z yönünde, hareketin ise x-y düzleminde;



$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ B_z \end{pmatrix} \quad P = \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ 0 \end{pmatrix} = m \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad F = \dot{P} = \frac{d}{dt}(mV) = eV \times B \quad \dot{P} = e \begin{pmatrix} V_y B_z \\ -V_x B_z \\ 0 \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} \dot{P}_x &= m\dot{v}_x = e v_y B_z \\ \dot{P}_y &= m\dot{v}_y = -e v_x B_z \end{aligned}$$

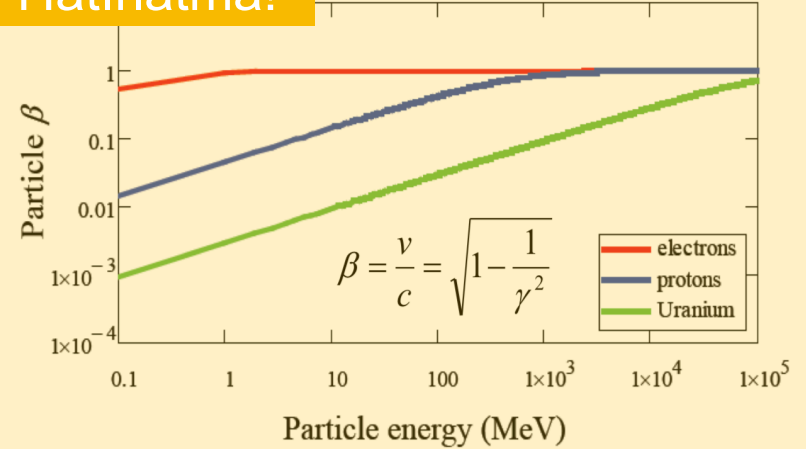
$$\ddot{v}_x + \frac{e^2}{m^2} B_z^2 v_x = 0 \quad v_x(t) = v_0 \cos w_z t$$

$$\ddot{v}_y + \frac{e^2}{m^2} B_z^2 v_y = 0 \quad v_y(t) = v_0 \sin w_z t$$

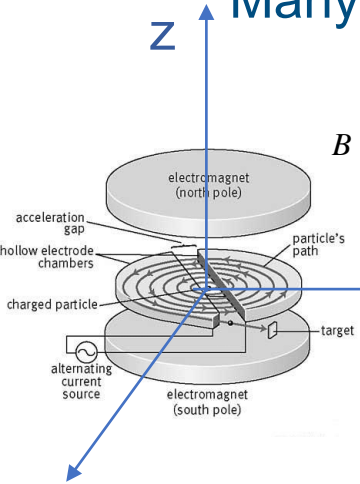
$w_z = \frac{e}{m} B_z$

Cyclotron freq.

## Hatırlatma!



Manyetik alan z yönünde, hareketin ise x-y düzleminde;



$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ B_z \end{pmatrix}$$

$$P = \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ 0 \end{pmatrix} = m \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$F = \dot{P} = \frac{d}{dt}(mV) = eV \times B$$

$$\dot{P} = e \begin{pmatrix} V_y B_z \\ -V_x B_z \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\dot{P}_x = m\dot{v}_x = ev_y B_z$$

$$\dot{P}_y = m\dot{v}_y = -ev_x B_z$$

$$\ddot{v}_x + \frac{e^2}{m^2} B_z^2 v_x = 0$$

$$v_x(t) = v_0 \cos w_z t$$

$$\ddot{v}_y + \frac{e^2}{m^2} B_z^2 v_y = 0$$

$$v_y(t) = v_0 \sin w_z t$$

$$w_z = \frac{e}{m} B_z$$

Cyclotron freq.

Üç tür siklotron vardır:

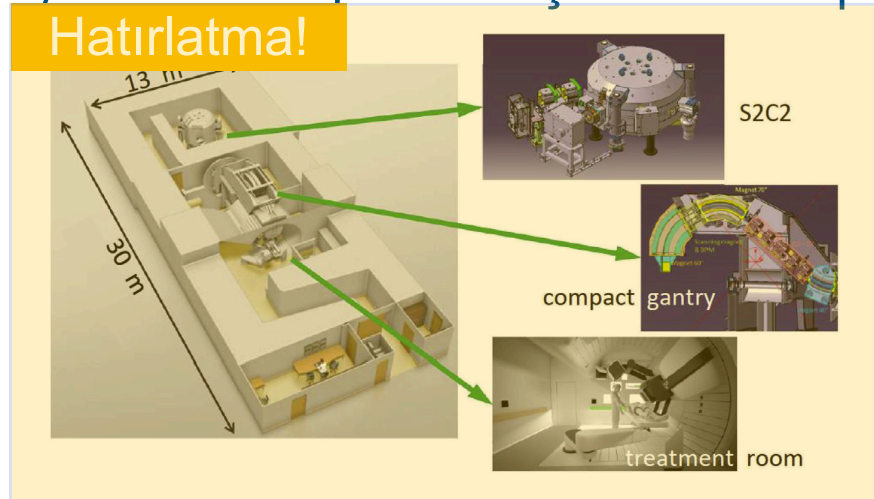
- **Klasik siklotron** (şimdiye kadar tartıştığımız); proton, deutron ve alfa parçacıklarını yaklaşık 22 MeV'e kadar hızlandırır. Bu enerjilerde parçacıklar hala non-roletivistiktir.

Üç tür siklotron vardır:

- **Klasik siklotron** (şimdiye kadar tartıştığımız); proton, deutron ve alfa parçacıklarını yaklaşık 22 MeV'e kadar hızlandırır. Bu enerjilerde parçacıklar hala non-roletivistiktir.
- **Sinkrosiklotron (synchrocyclotron)**: yüksek enerjilerde artık siklotron frekansı sabit değildir.

$$w_z = \frac{e}{m(E)} B_z$$

Eğer RF frekansını da azaltırsak daha yüksek enerjilere ulaşılabilir. Bu prensip sinkrosiklotronunda benimsenmiştir.





## Üç tür siklotron vardır:

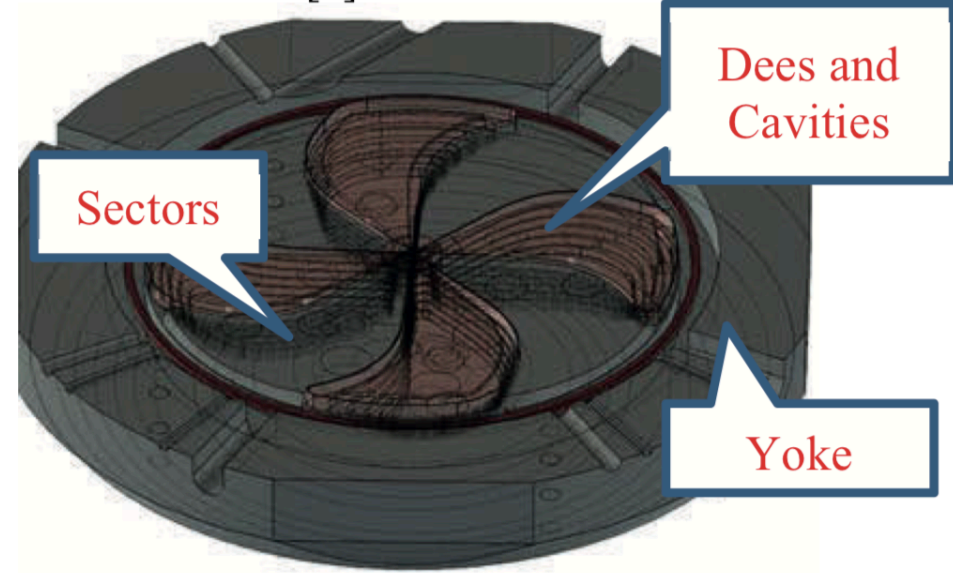
- **Klasik siklotron** (şimdiye kadar tartışıldığı parçacıklarını yaklaşık 22 MeV'e kadar non-roletivistiktir.
- **Sinkrosiklotron (synchrocyclotron):**  $\gamma$  sabit değildir.

Eğer RF frekansını da azaltırsak daha  $\gamma$  sinkrosiklotronunda benimsenmiştir.

- **İzosiklotron (isocyclotron)**, burada daha etkili bir metod uygulanmıştır. Siklotron frekansı aynı kalacak şekilde radyal manyetik alan artırılır.

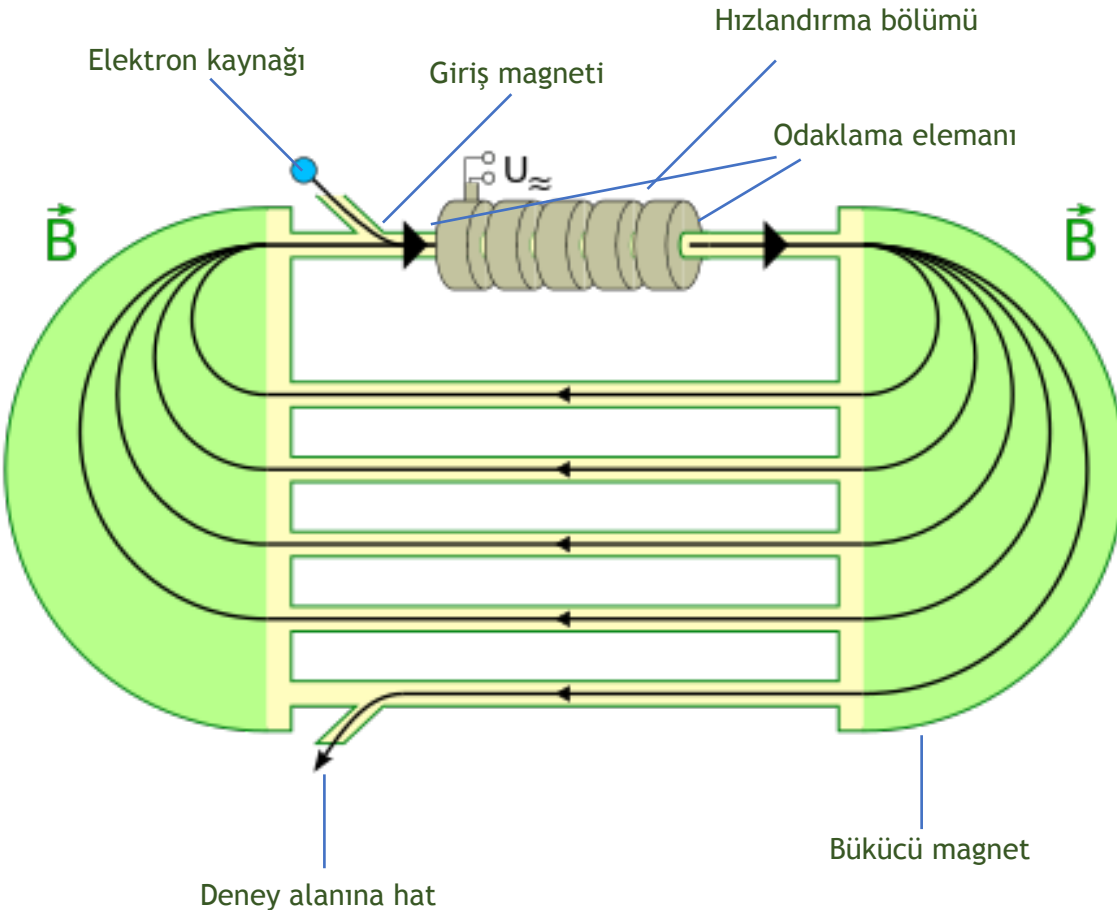
$$w_z = \frac{e}{m(E)} B_z(r(E))$$

Değişen manyetik alandan dolayı oluşan odaklama sorununu özel magnetler kullanarak aşmıştır. İzosiklotron **600 MeV**'lere kadar enerjilere ulaşabilir.





- Çok daha çabuk bir şekilde **roletivistik hızlara** ( $v \sim c$ ) ulaştığı için siklotron prensibi (sabit dolanım frekansı) elektronlara uygulanmaz.



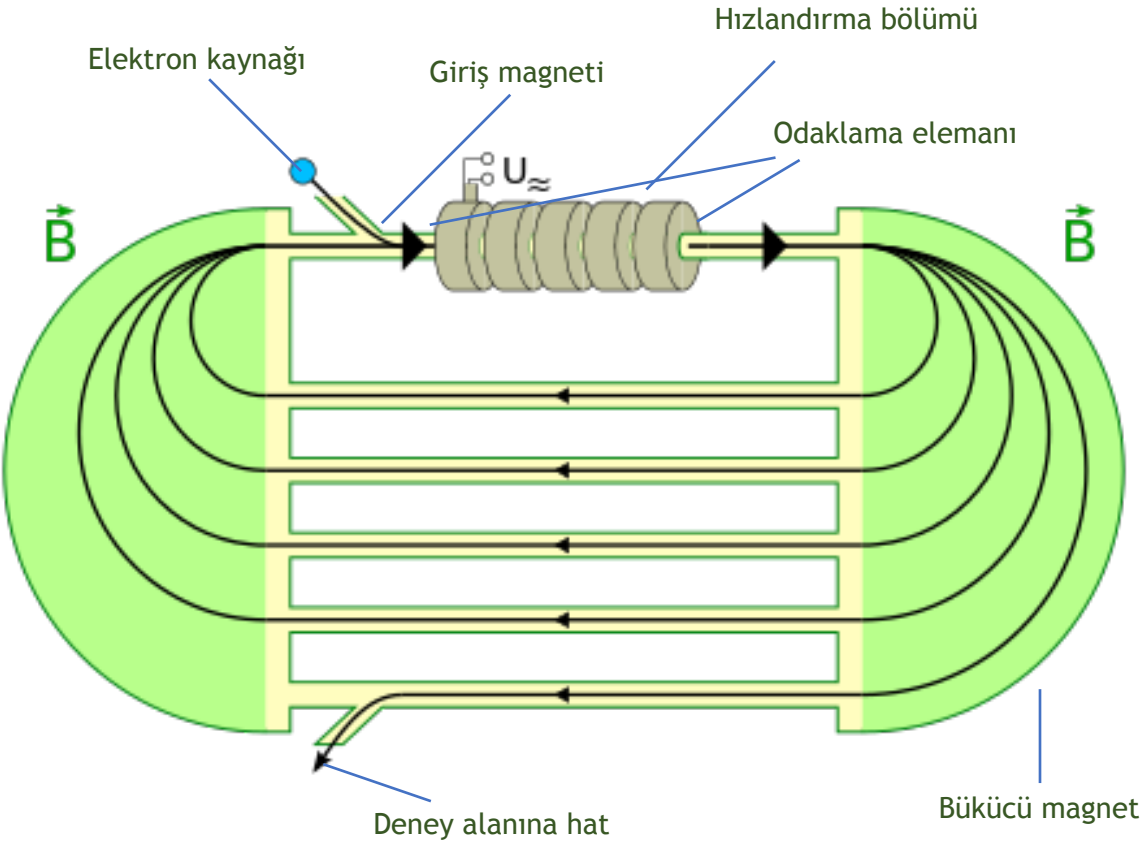
## Hatırlatma!

$$m_e c^2 = 511 \text{ keV}$$

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

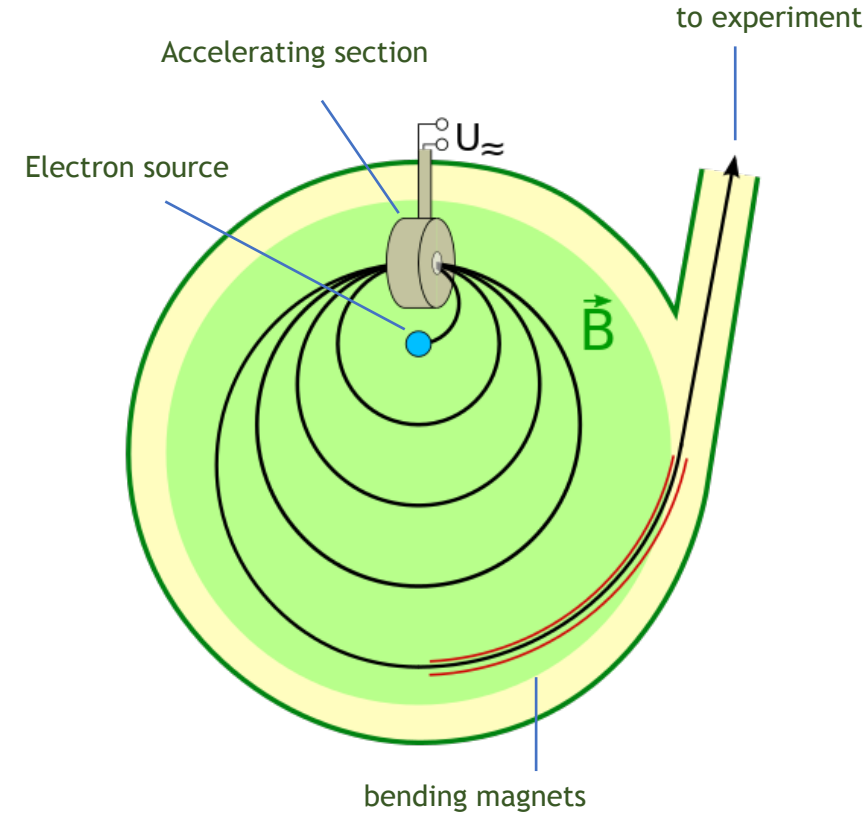
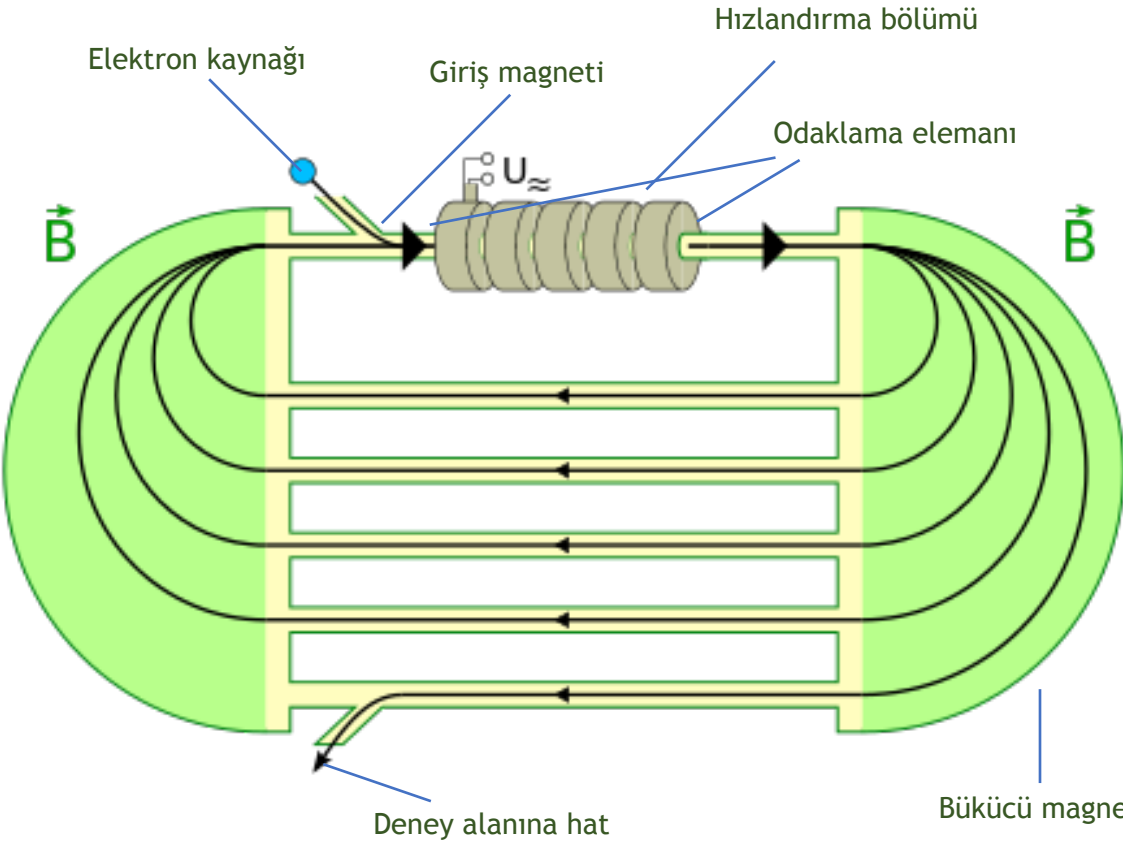
$$\gamma = \frac{E}{m_e c^2}$$

- Siklotron frekansı kütle ile ters orantılı olarak azalır ve bu etki frekans değişimi veya magnet şekliyle telafi edilemez.



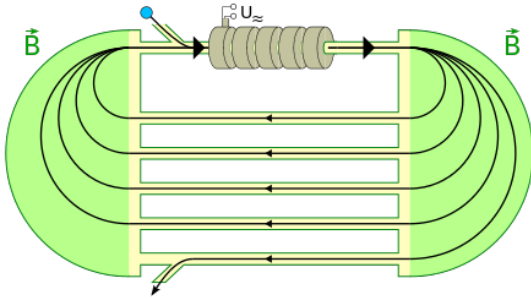
- Mikrotron aslında elektronlar için bir tür siklotronudur.
- Parçacıkların her seferinde aynı RF fazını hissetmesi sorunu yüksek RF frekans, düşük dalga boyu ve tur başına enerji kazanımının ayarlanması ile aşılabılır.
- Böylece tur başına çevre artışı miktarı RF dalgaboyu bir tam sayı katı olur. Mikrotronda bu yöntem uygulanır.

- İki tür mikrotron vardır; kompakt ve racetrack;



- Hala bazı hızlandırıcı uygulamaları (özellikle medikal uygulamalar) için kullanılıyor (yaklaşık 20 MeV enerji-kompakt, ama daha yüksek enerjilere çıkmak da mümkün; yaklaşık 100 MeV).

- Mikrotronun prensibini anlatmak için racetrack yapısını düşünelim.



$$E_{out} = E_{inj} + N \cdot \Delta E$$

i'nci turdaki bükme yarıçapı

İki magnet arasındaki mesafe

$$t_i = \frac{2(\pi R_i + l)}{v_i}$$

i'nci dolanım zamanı

i'nci turdaki elektronun hızı

- Merkezci kuvveti - Lorentz kuvvetine eşitlersek;

$$R_i = \frac{v_i m_i c^2}{e c^2 B} = \frac{v_i}{e c^2 B} E_i$$

Elektronun tur başına kazanması gereken enerji

$$\Delta E = k \frac{e c^2 B}{2\pi \nu_{RF}}$$

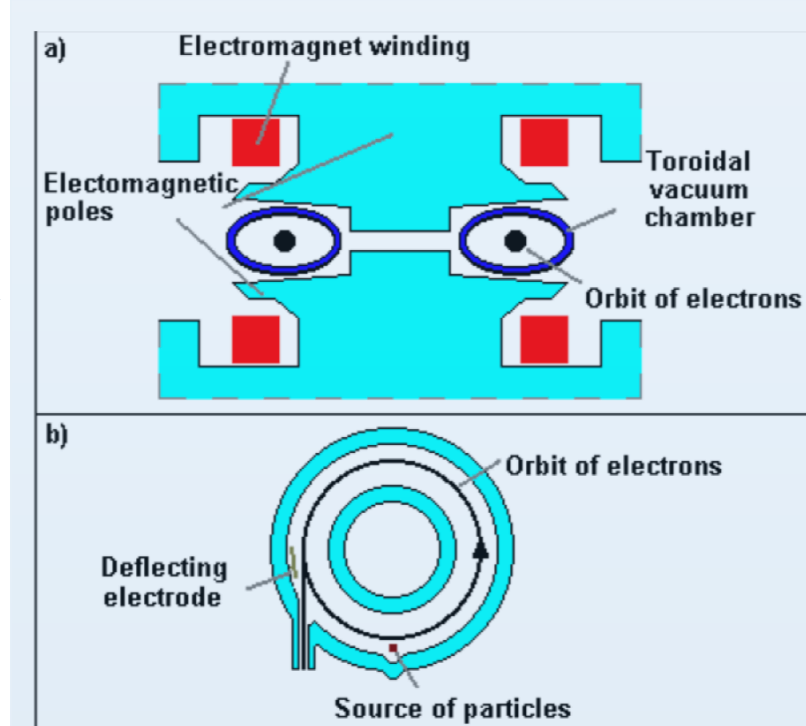
- Bu denklemi ilk denkleme yerine yazarsak;

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i = \frac{2\pi}{e c^2 B} (E_{i+1} - E_i) = \frac{2\pi}{e c^2 B} \Delta E$$

- Bu iki dolanım arasındaki fark RF frekansının tam katı olmalıdır:  $\Delta t = k/\nu_{RF}$

# Betatron

- Şimdiye kadar konuştuğumuz **siklotron** ve **mikrotron** hızlandırıcılarında **manyetik alan sabit** ve parçacık yörüngesi enerji ile artıyordu. **Betatron**da ise enerji ile birlikte **manyetik alan da artırılıyor**; böylece, **parçacık yörüngesi sabit** kalıyor.
- **Elektrik alan için değişen manyetik alan** kullanılıyor, ekstra hızlandırma elemanı yok.
- İlk üretilen betatron elektronları **2.3 MeV** enerjiye çıkardı. Daha sonra Kerst 1950 yılında **300 MeV**'lik bir betatron üretti.
- Wideröe'nin **1923**'lerden itibaren elektron hızlandırıcısı olarak geliştirdiği makine daha sonra betatron olarak anıldı ve ilk defa **1940**'da Kerst tarafından üretildi.
- Hala **medikal** alan uygulamalarında kullanılır.
- Kerst ve Serber ilk defa **demet salınımı (betatron salınımı)** tanımlamış ve bugün hala aynı kavram hızlandırıcılarda kullanılmaktadır.



- Parçacık fiziğinin ilerlemesi için, şimdiye kadar tartıştığımız göreceli **kompakt** hızlandırıcılardan (siklotron, mikrotron, betatron, ...) **daha fazlasına** ihtiyacımız var.
- Dipol magnet için manyetik alan sınırı: **~2 T** (geleneksel), süperiletken magnetler için daha yüksek (**~8 T-LHC**, **~14 T-FCC**).

Hatırlatma!

$$R_i = \frac{v_i m_i c^2}{ec^2 B} = \frac{v_i}{ec^2 B} E_i$$

$v \sim c$

$$R = \frac{E}{ecB}$$

- 1 GeV'in üzerine çıkıldığında parçacık yörüngesinin büyümesiyle, böylesine magnetlerin üretimi de zorlaşır.
- Bu sorunu aşacak şekilde, yalnızca demetin olduğu bölgeye manyetik alan uygulayan sabit bükme yarıçaplı magnetlerin kullanıldığı yeni bir tasarım geliştirildi.
  - Bu durumda  $E/B$  sabit olmalı yani, manyetik alan enerji ile **senkron** bir şekilde artmalı.



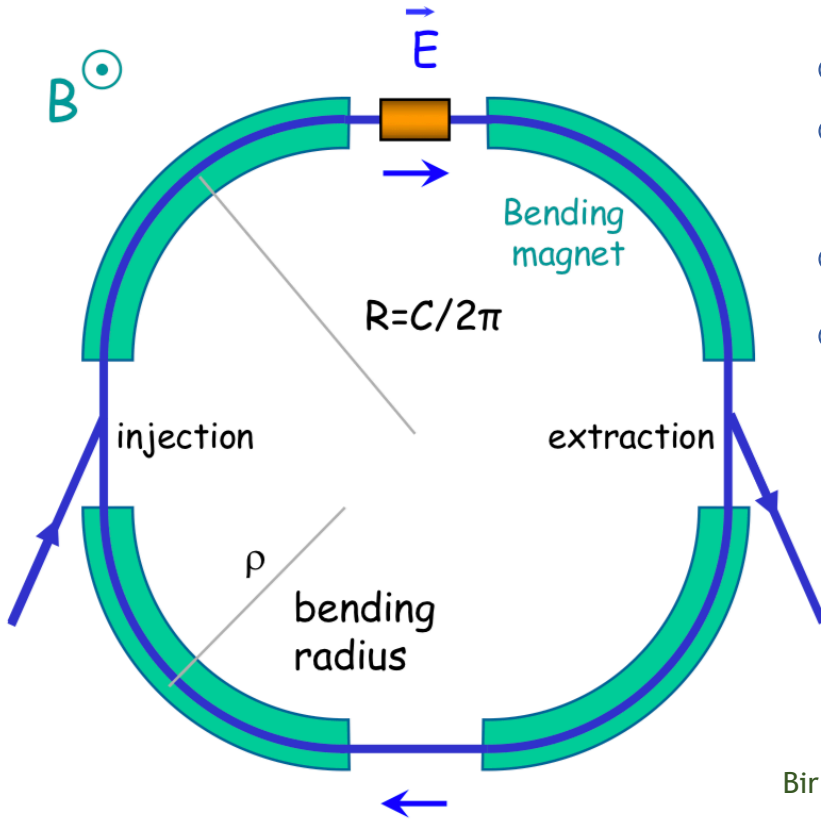


Fig: F. Tecker, 2016 CAS lecture

- Hızlanma boyunca **sabit yörünge**
- Parçacıkları yörüngede tutmak için **manyetik alan zamanla artmalı** (enerji artışı varsa)
- $w$  ve  $w_{RF}$  enerji ile artar
- Eğer  $v \approx c$  (ultra-roletivistik)  $w$  ve  $w_{RF}$  sabit kalır

Harmonik sayısı

$$w_{RF} = hw$$

Bir turda kazanılan enerji

$$\Delta E_{beam} = eU_{max} \sin \phi_0 - \Delta E_{loss}$$

Manyetik alan

$$B\rho = P/e$$

- **Sinkrotron** hızlandırıcısına bir kaç **örnek** için **CERN** hızlandırıcı kompleksini inceleyelim.

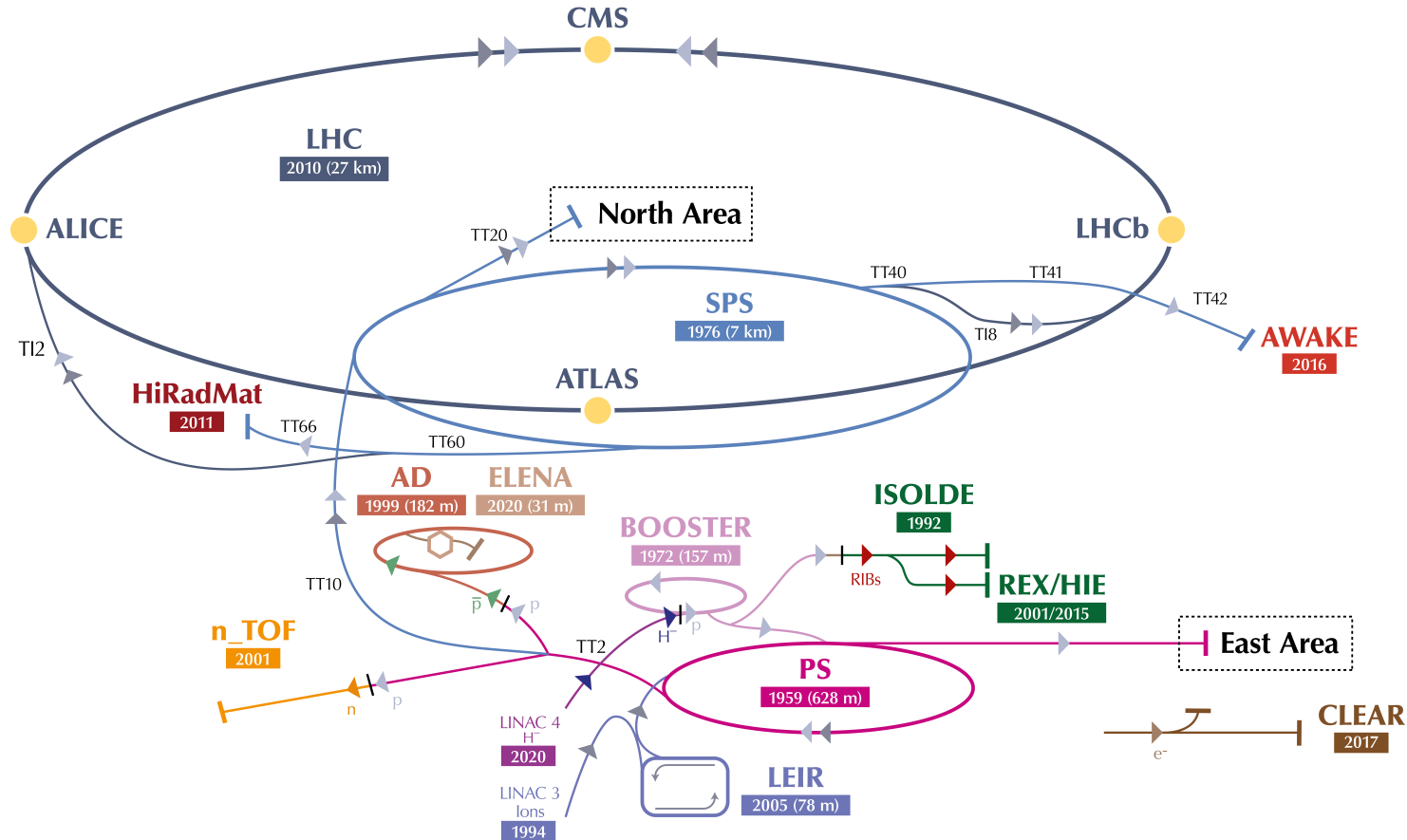


Fig: <https://cds.cern.ch/record/2684277/files/CCC-v2019-final-white.png>

- Hangi elektromanyetik elemanlar akla gelmelidir?
- Hangi demet parametreleri akla gelmelidir?

- Bir hızlandırıcı tasarımının **amacı** (çoğu zaman) bir önceki hızlandırıcıdan gelen demeti **kabul** etmek, demetin **enerjisini artırmak** veya **sabit tutmak** ve sonraki hızlandırıcı için gerekli **demet karakteristiğini** sağlayarak demetin çıkışını sağlamak.
- Bu, hızlandırıcı içerisine **elektromanyetik elemanların** belirli dizilimleriyle gerçekleştirilir:

- Bükücü magnet

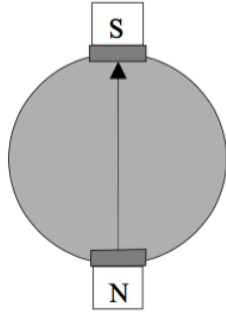


Fig: Gijs de Rijk, 2016 CAS lecture

Çembersel hızlandırıcı boyunca parçacıkların yörüngesini bükmek için kullanılır. Kapalı yörüngeyi belirler.

Beraberinde bazı parametreler tanımlar:

- **Dispersiyon:** momentumla ilişkili olarak Yörüngedeki değişim olarak tanımlanır.

$$x(s) = \eta(s) \frac{\Delta P}{P_0}$$

- **Momentum sıkışıklık faktörü:** momentum yayılımına bağlı olarak parçacığın aldığı yoldaki değişim olarak tanımlanır.

$$\alpha_c = \frac{\Delta L/L}{\Delta P/P} = \frac{1}{C} \oint \frac{\eta(s) ds}{\rho}$$

- Bir hızlandırıcı tasarımının **amacı** (çoğu zaman) bir önceki hızlandırıcıdan gelen demeti **kabul** etmek, demetin **enerjisini artırmak** veya **sabit tutmak** ve sonraki hızlandırıcı için gerekli **demet karakteristiğini** sağlayarak demetin çıkışını sağlamak.
- Bu, hızlandırıcı içerisine **elektromanyetik elemanların** belirli dizilimleriyle gerçekleştirilir:

- Bükücü magnet
- Odaklayıcı magnet

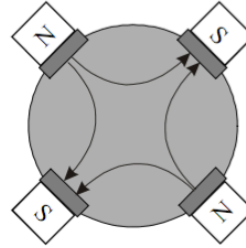


Fig: Gijs de Rijk, 2016 CAS lecture

Demeti odaklar. Kapalı orbit etrafında betatron salınımını ve beta fonksiyonunu tanımlar.

Beraberinde bazı parametreler tanımlar:

- **Kromatiklik:** Hızlandırıcı demet hattında, parçacık enerjisiyle ayardaki (tune) değişim olarak tanımlanır.

$$\Delta Q = Q' \frac{\Delta P}{P}$$

- **Betatron faz ilerlemesi** and **betatron ayarı** (tur başına betatron salınımı sayısı):

$$Q = \frac{P \times \phi}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \oint \frac{ds}{\beta(s)}$$

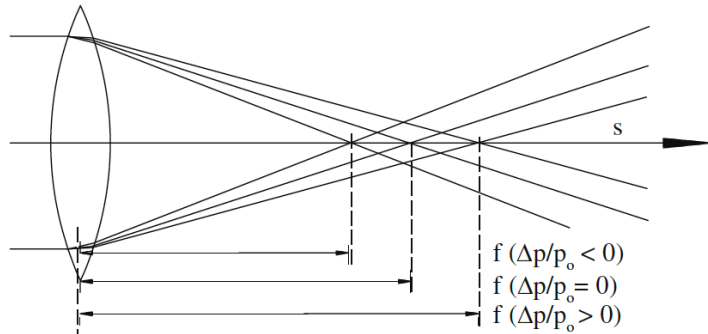


Fig: H. Widemann, Springer, fourth edition

- Bir hızlandırıcı tasarımının **amacı** (çoğu zaman) bir önceki hızlandırıcıdan gelen demeti **kabul** etmek, demetin **enerjisini artırmak** veya **sabit tutmak** ve sonraki hızlandırıcı için gerekli **demet karakteristiğini** sağlayarak demetin çıkışını sağlamak.
- Bu, hızlandırıcı içerisine **elektromanyetik elemanların** belirli dizilimleriyle gerçekleştirilir:

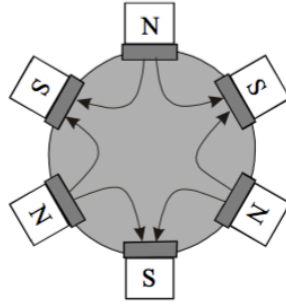


Fig: Gijs de Rijk, 2016 CAS lecture

Kromatik etkiyi düzeltir.

- Bükücü magnet
- Odaklayıcı magnet
- Sekstupol magnet

Bununla birlikte demetin dinamik davranışı üzerinde negatif bir etki bırakır:

**Linear olmayan etkiler:** Demet dinamiği Üzerinde linear olmayan (sestupol, octupol gibi) elemanların etkisini ifade eder.

- Bu etki **dinamik aralığı** sınırlayabilir.

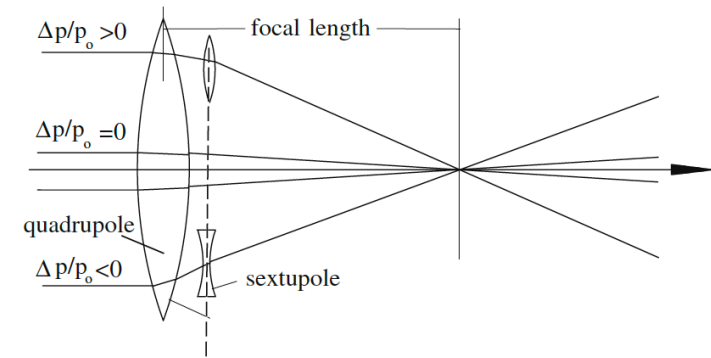
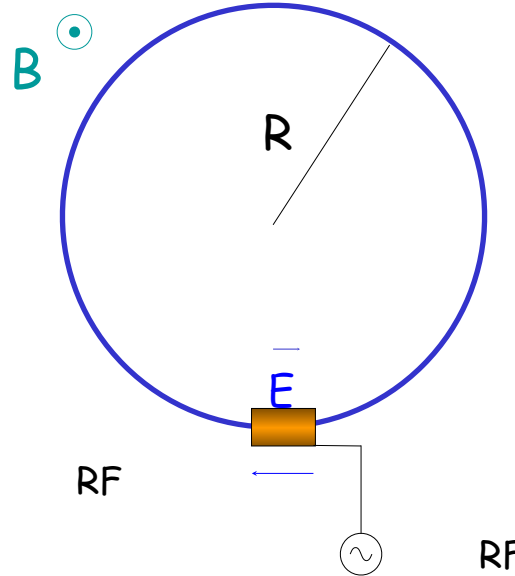


Fig: H. Widemann, Springer, fourth edition



- Bir hızlandırıcı tasarımının **amacı** (çoğu zaman) bir önceki hızlandırıcıdan gelen demeti **kabul** etmek, demetin **enerjisini artırmak** veya **sabit tutmak** ve sonraki hızlandırıcı için gerekli **demet karakteristiğini** sağlayarak demetin çıkışını sağlamak.
- Bu, hızlandırıcı içerisine **elektromanyetik elemanların** belirli dizilimleriyle gerçekleştirilir:

- Bükücü magnet
- Odaklayıcı magnet
- Sekstupol magnet
- RF kavite



Enerji kazanmak veya kaybolan enerjiyi telafi etmek için kullanılır.

Sinkrotron salınımını tanımlar.

Fig: Frank Tecker, 2016 CAS lecture

- Bir hızlandırıcı tasarımının **amacı** (çoğu zaman) bir önceki hızlandırıcıdan gelen demeti **kabul** etmek, demetin **enerjisini artırmak** veya **sabit tutmak** ve sonraki hızlandırıcı için gerekli **demet karakteristiğini** sağlayarak demetin çıkışını sağlamak.
- Bu, hızlandırıcı içerisine **elektromanyetik elemanların** belirli dizilimleriyle gerçekleştirilir:

- Bükücü magnet
- Odaklayıcı magnet
- Sekstupol magnet
- RF kavite

**Boyuna kabul:** Halen kararlı **sinkrotron salınımı** yapabilen maksimum enerji sapmasının sınırına halkanın **enerji kabulü** (energy acceptance) denir.

Sinkrotron salınımı:

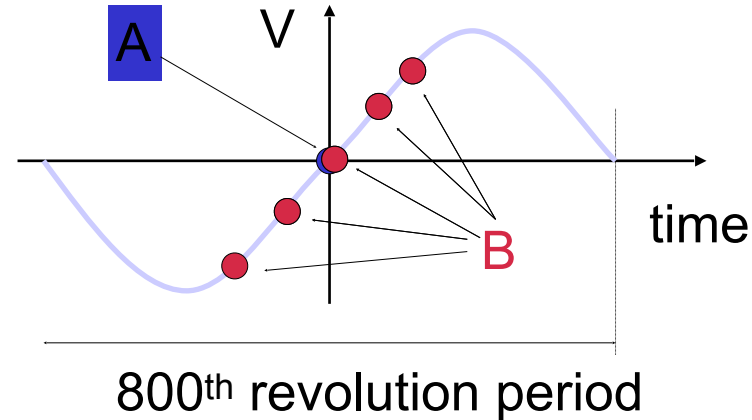


Fig: Frank Tecker, 2017 CAS lecture

# Demet parametreleri

- Bir hızlandırıcı tasarımının **amacı** (çoğu zaman) bir önceki hızlandırıcıdan gelen demeti **kabul** etmek, demetin **enerjisini artırmak** veya **sabit tutmak** ve sonraki hızlandırıcı için gerekli **demet karakteristiğini** sağlayarak demetin çıkışını sağlamak.
- Bu, hızlandırıcı içerisine **elektromanyetik elemanların** belirli dizilimleriyle gerçekleştirilir:

- Dipole magnets
- Quadrupole magnets
- Sextupole magnets
- Radio-frequency cavity
- Normal sönümlenme magneti
- Robinson sönümlenme magneti

} Eklenti cihazları demet parametrelerini manipule etmek veya sinkrotron ışınımı üretmek için kullanılır.

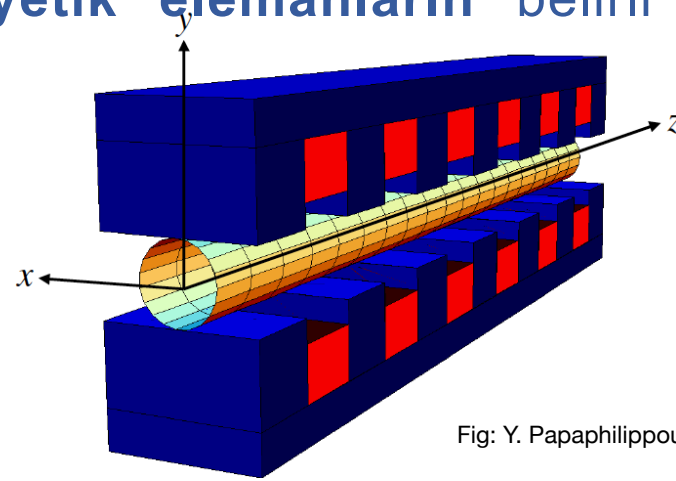


Fig: Y. Papaphilippou, 2016 LC school lecture

# Demet parametreleri

- Bir hızlandırıcı tasarımının **amacı** (çoğu zaman) bir önceki hızlandırıcıdan gelen demeti **kabul** etmek, demetin **enerjisini artırmak** veya **sabit tutmak** ve sonraki hızlandırıcı için gerekli **demet karakteristiğini** sağlayarak demetin çıkışını sağlamak.
- Bu, hızlandırıcı içerisine **elektromanyetik elemanların** belirli dizilimleriyle gerçekleştirilir:

- Dipole magnets
- Quadrupole magnets
- Sextupole magnets
- Radio-frequency cavity
- Normal sönümlenme magneti
- Robinson sönümlenme magneti
- Düzeltici magnet
- Demet görüntüleme cihazı
- ...

} Demeti görüntülemek ve hataları düzeltmek için kullanılır.

Example LHC:

B. Holzer, 2016, CAS lecture



7000 GeV Proton storage ring  
dipole magnets  $N = 1232$   
 $l = 15$  m  
 $q = +1 e$

$$\int B dl \approx N l B = 2\pi p / e$$

?

- Bir dipolün manyetik alanı nedir?

- Bir kaç soru ile bu gerçek örneği inceleyelim;
  - 7 TeV'lik proton demetini 27 km'lik sinkrotronda dolandırmak için 1232 bükücü magnet (her biri 15 m) kullanılmaktadır.
  - Bu durumda bükme yarıçapı nedir?

$$B\rho = P/e$$

?

- Dipol dolum oranı nedir?

$$F = Nl/C$$

?



Example LHC:

B. Holzer, 2016, CAS lecture



7000 GeV Proton storage ring  
dipole magnets  $N = 1232$   
 $l = 15$  m  
 $q = +1 e$

$$\int B dl \approx N l B = 2\pi p / e$$

?

- Bir kaç soru ile bu gerçek örneği inceleyelim;

- ....
- Bükme yarıçapı nedir?

$$\theta = 360/N$$

?

- Kaç FODO hücresi kullanılmıştır?

?

- $W_{rf} = 400$  MHz ise en fazla kaç paketçik hızlandırılabilir?

$$W_{RF} = h\omega_0$$

?

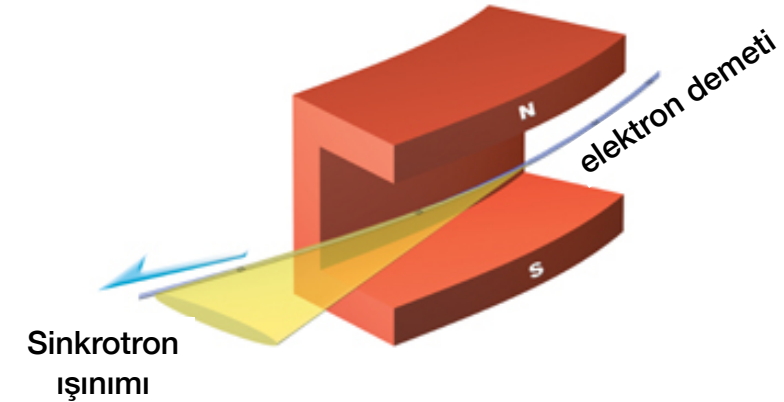


- **Sinkrotron ışınımı:** Yüklü bir parçacık ivmeli hareket altında ışınım yayar:
  - Bu durum, hafif parçacıkların demet özellikleri üzerinde güçlü etkilere neden olabilir.

- Karakteristik sönüm zamanı ile emittans'ta azalmaya neden olur.

$$\epsilon = \epsilon_0 e^{-t/\tau}$$

- Sinkrotron ışınımı yüzünden enerji kaybına neden olur: **turn başına enerji kaybı**
- **Emittans, enerji yayılımı** gibi önemli parametreler sinkrotron ışınımı ile değişikliğe uğrar.



**Hatırlatma!**

$$\Delta E_{beam} = eU_{max} \sin \phi_0 - \Delta E_{loss}$$

- **Sinkrotron ışınımı:** Yüklü bir parçacık ivmeli hareket altında ışınım yayar:
  - Bu durum, hafif parçacıkların demet özellikleri üzerinde güçlü etkilere neden olabilir.

- Karakteristik sönüm zamanı ile emittans'ta azalmaya neden olur.

$$\epsilon = \epsilon_0 e^{-t/\tau}$$

- Sinkrotron ışınımı yüzünden enerji kaybına neden olur: **tur başına enerji kaybı**

- **Emittans, enerji yayılımı** gibi önemli parametreler sinkrotron ışınımı ile değişikliğe uğrar.

- Parçacık hızlandırıcılarında yüklü parçacık demetinin bir ölçüsüdür. Konum-momentum faz uzayında, parçacık koordinatlarının ortalama yayılımının bir ölçüsüdür.

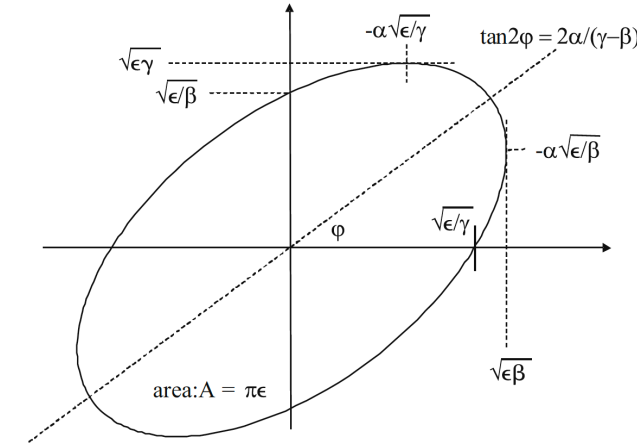
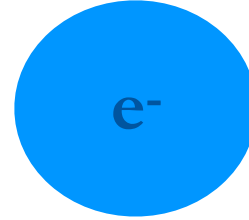


Fig: H. Widemann, Springer, fourth edition

- Parçacık nedir? Paketçik nedir? Paketçik treni nedir? Demet nedir?

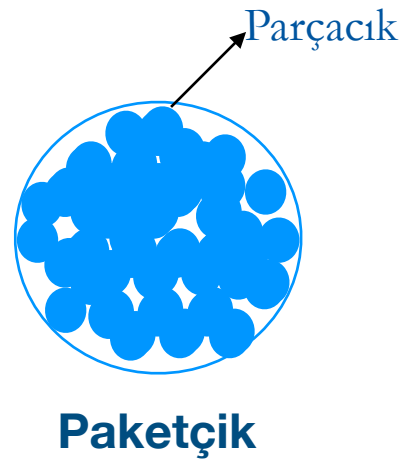
- Parçacık nedir? Paketçik nedir? Paketçik treni nedir? Demet nedir?



**Parçacık**

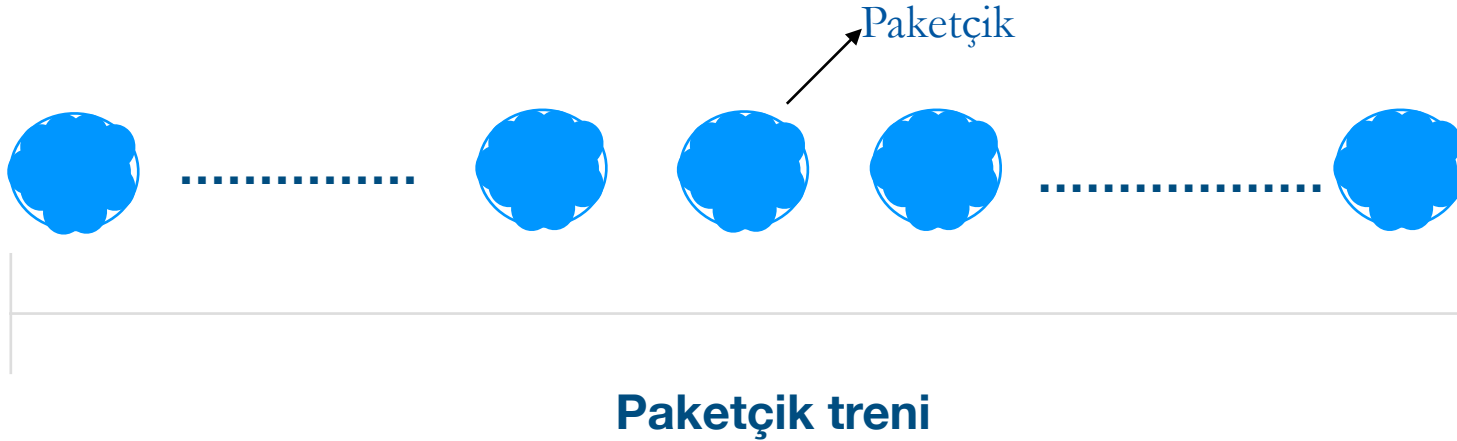
Parçacıklar, hızlandırıcı içerisinde yalnız hareket etmezler.

- Parçacık nedir? Paketçik nedir? Paketçik treni nedir? Demet nedir?



Birçok parçacık ( $10^{10}$ - $10^{13}$ ) bir arada hareket ederler, buna paketçik (bunch) denir.

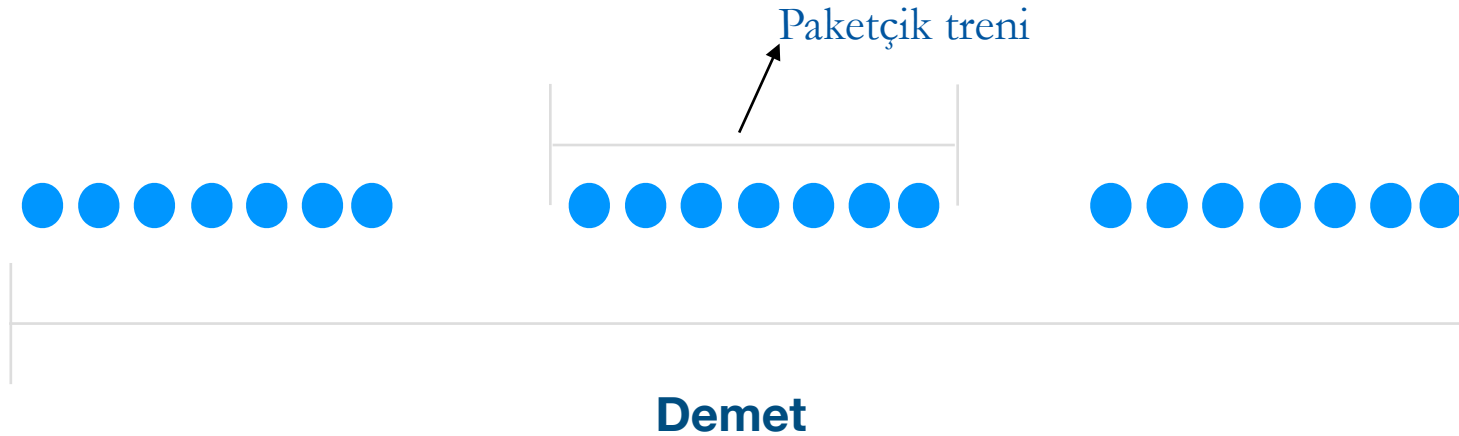
- Parçacık nedir? Paketçik nedir? Paketçik treni nedir? Demet nedir?



Bu paketçikler hızlandırıcı içerisine aralarında belirli bir mesafe ile hareket ederler. Buna paketçik treni (bunch train) denir.

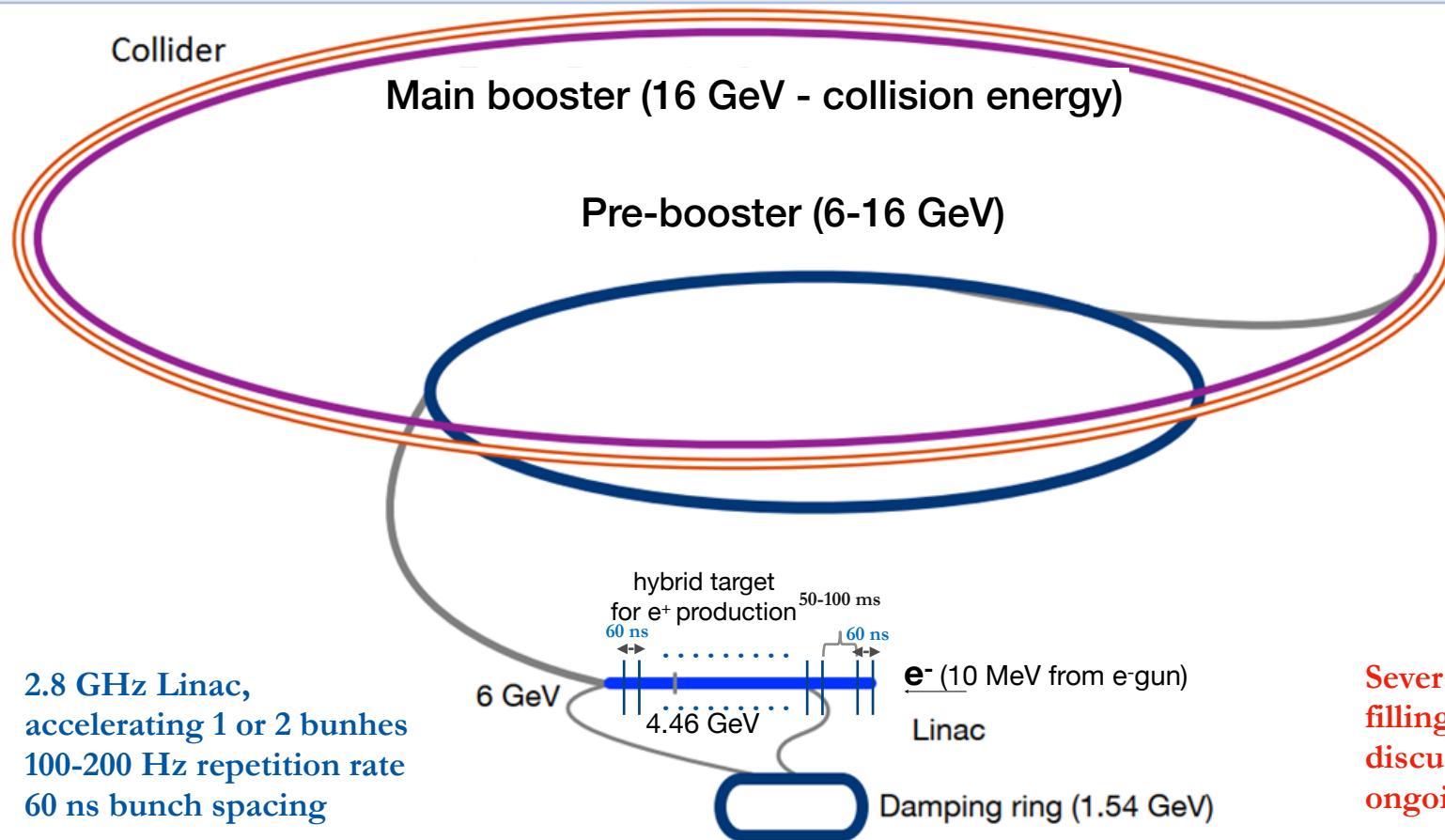


- Parçacık nedir? Paketçik nedir? Paketçik treni nedir? Demet nedir?

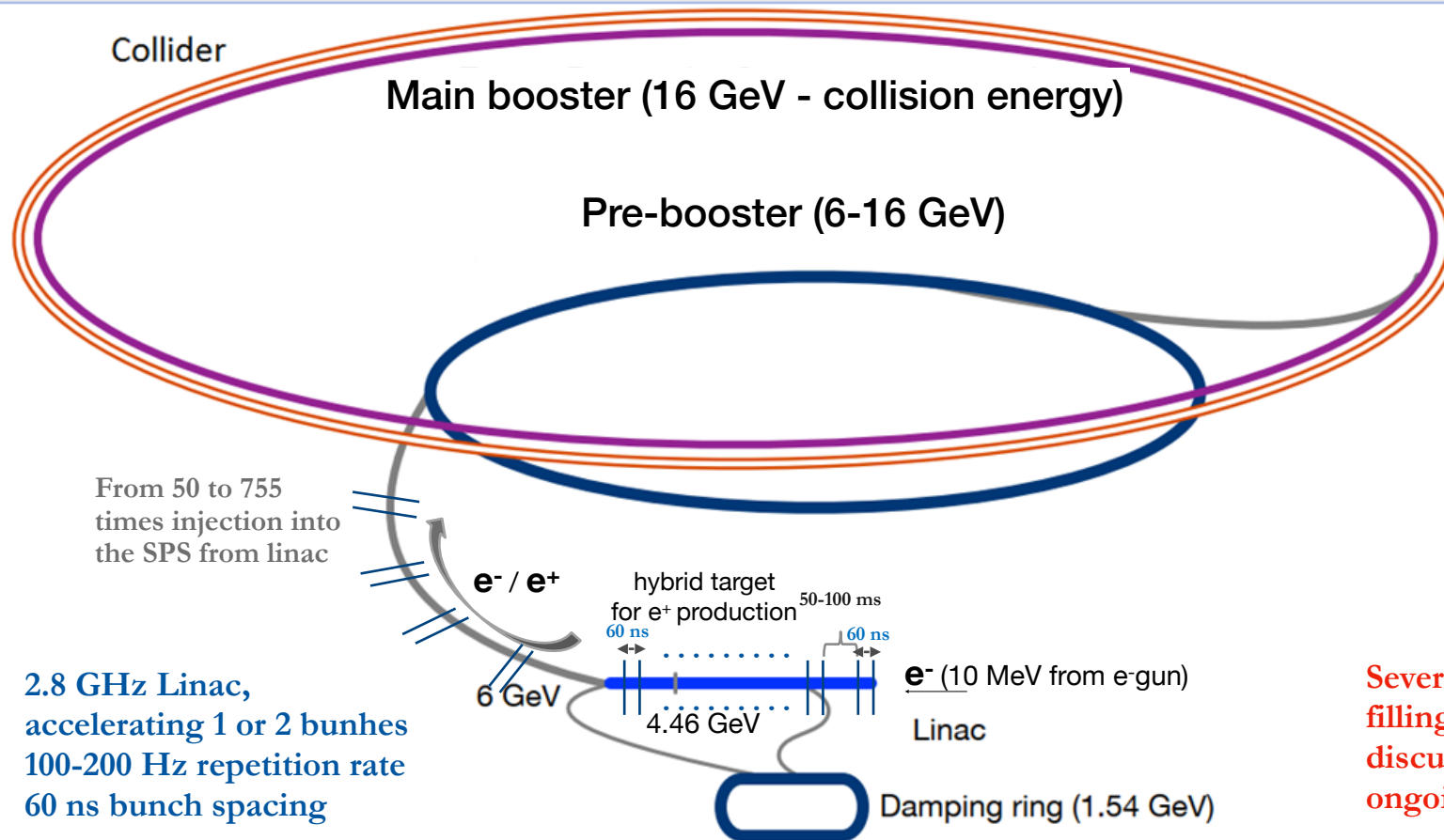


Bir çok (veya bir) paketçik treni hızlandırıcı içerisinde hareket eder. Buna demet (beam) denir.

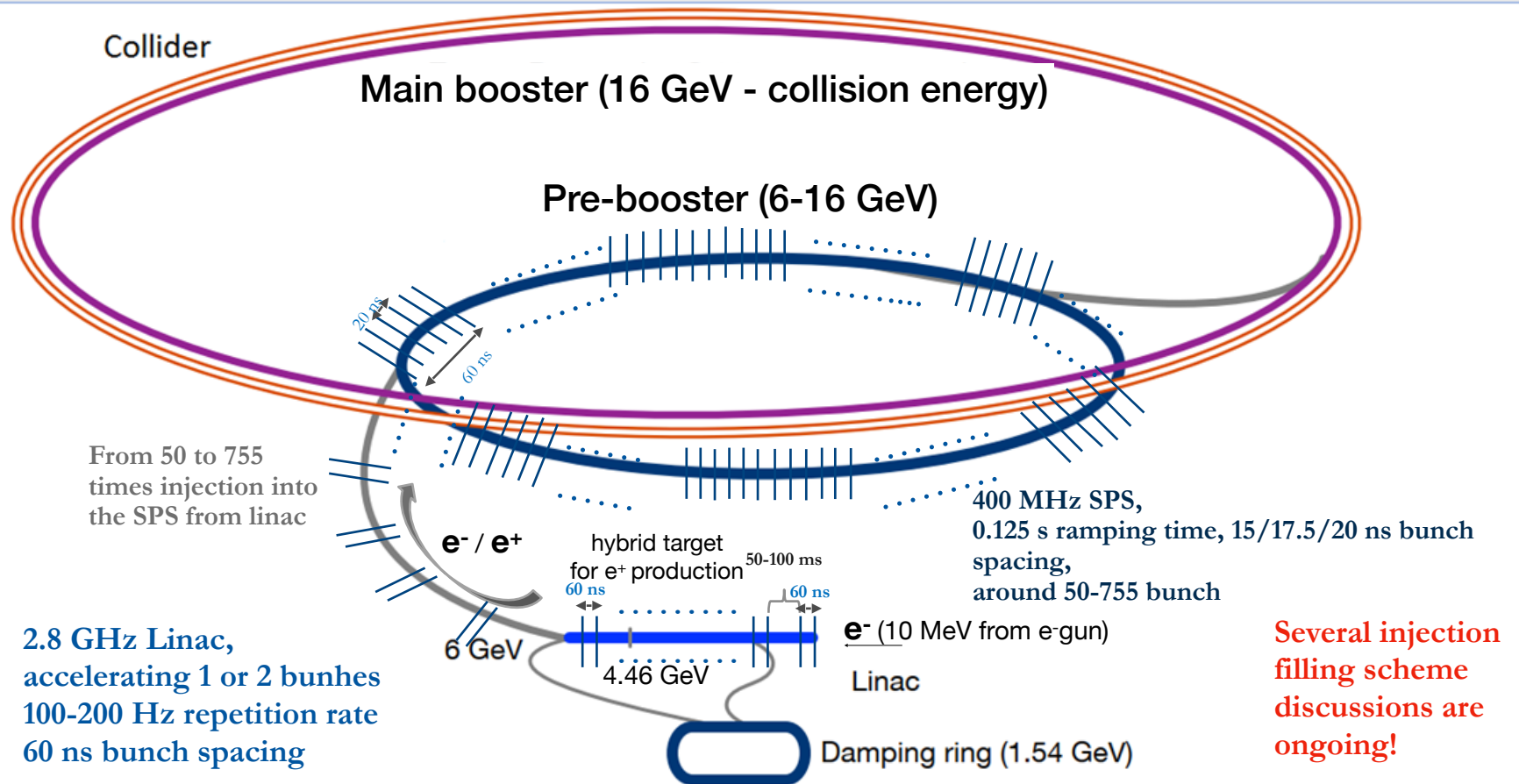
- Hızlandırıcılar nasıl dolduruluyor?
- Karmaşık parçacık hızlandırıcılarının transfer hattı, giriş ve çıkış süreçlerini incelemeye başlamadan bir örnek ile (FCC-ee) süreci inceleyelim.



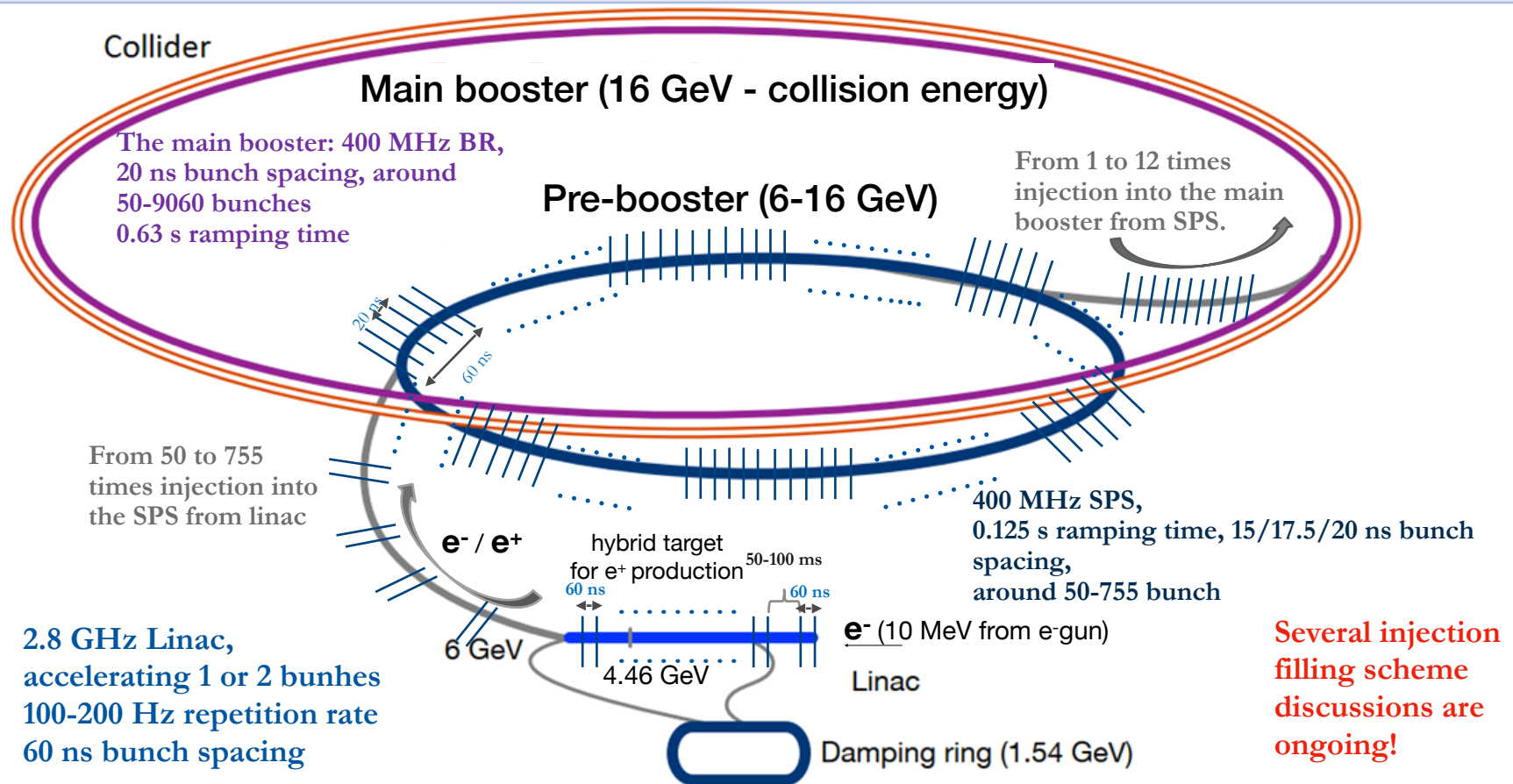
- Hızlandırıcılar nasıl dolduruluyor?
- Karmaşık parçacık hızlandırıcılarının transfer hattı, giriş ve çıkış süreçlerini incelemeye başlamadan bir örnek ile (FCC-ee) süreci inceleyelim.



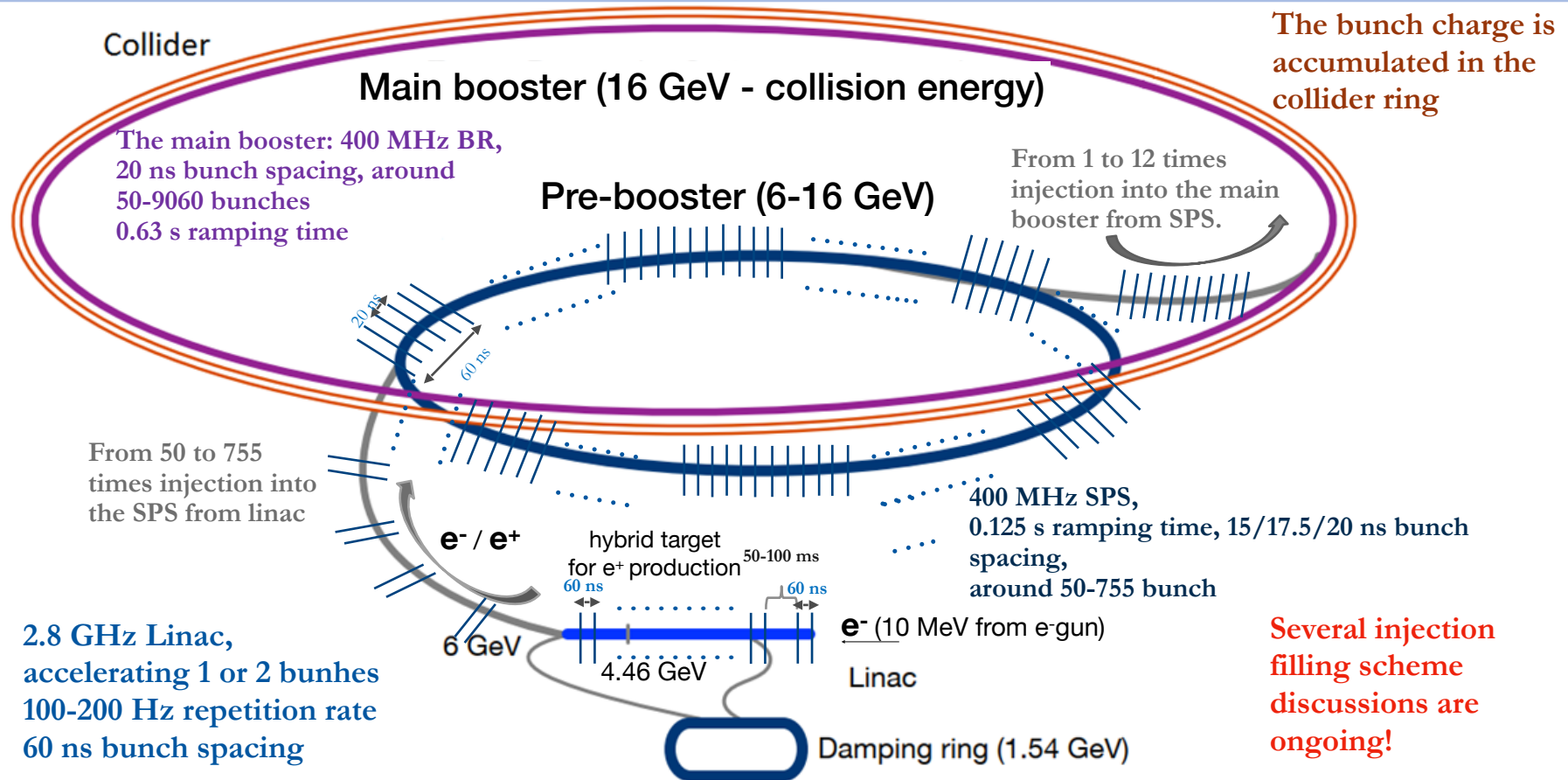
- Hızlandırıcılar nasıl dolduruluyor?
- Karmaşık parçacık hızlandırıcılarının transfer hattı, giriş ve çıkış süreçlerini incelemeye başlamadan bir örnek ile (FCC-ee) süreci inceleyelim.



- Hızlandırıcılar nasıl dolduruluyor?
- Karmaşık parçacık hızlandırıcılarının transfer hattı, giriş ve çıkış süreçlerini incelemeye başlamadan bir örnek ile (FCC-ee) süreci inceleyelim.

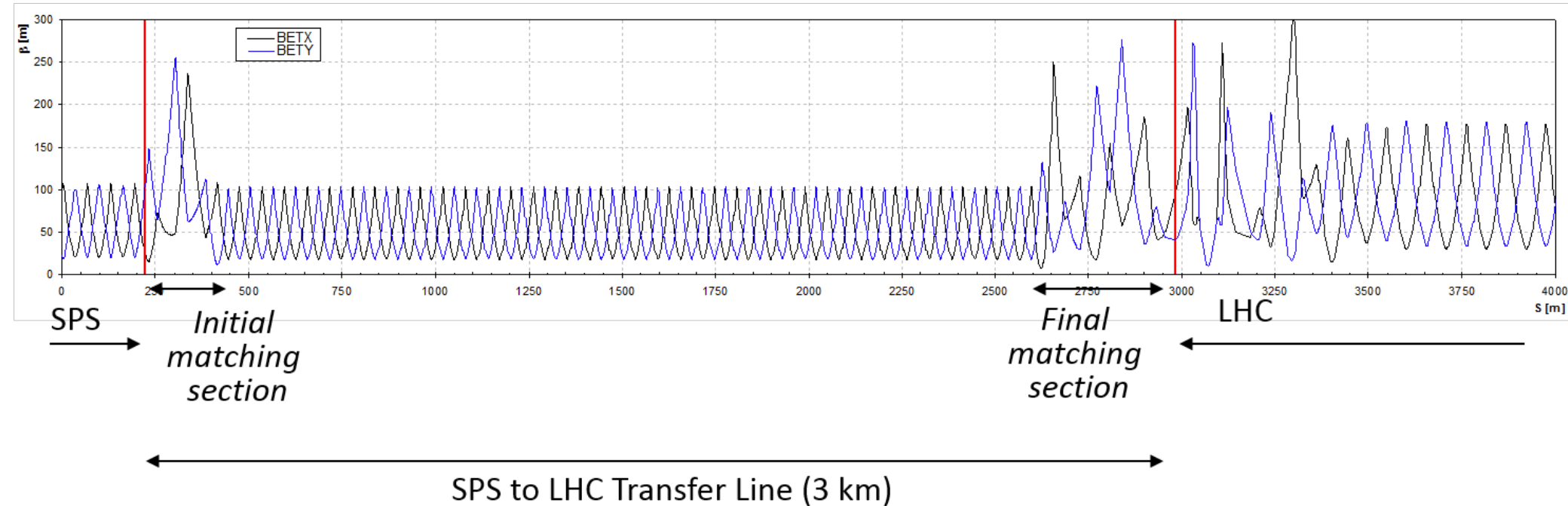


- Hızlandırıcılar nasıl dolduruluyor?
- Karmaşık parçacık hızlandırıcılarının transfer hattı, giriş ve çıkış süreçlerini incelemeye başlamadan bir örnek ile (FCC-ee) süreci inceleyelim.





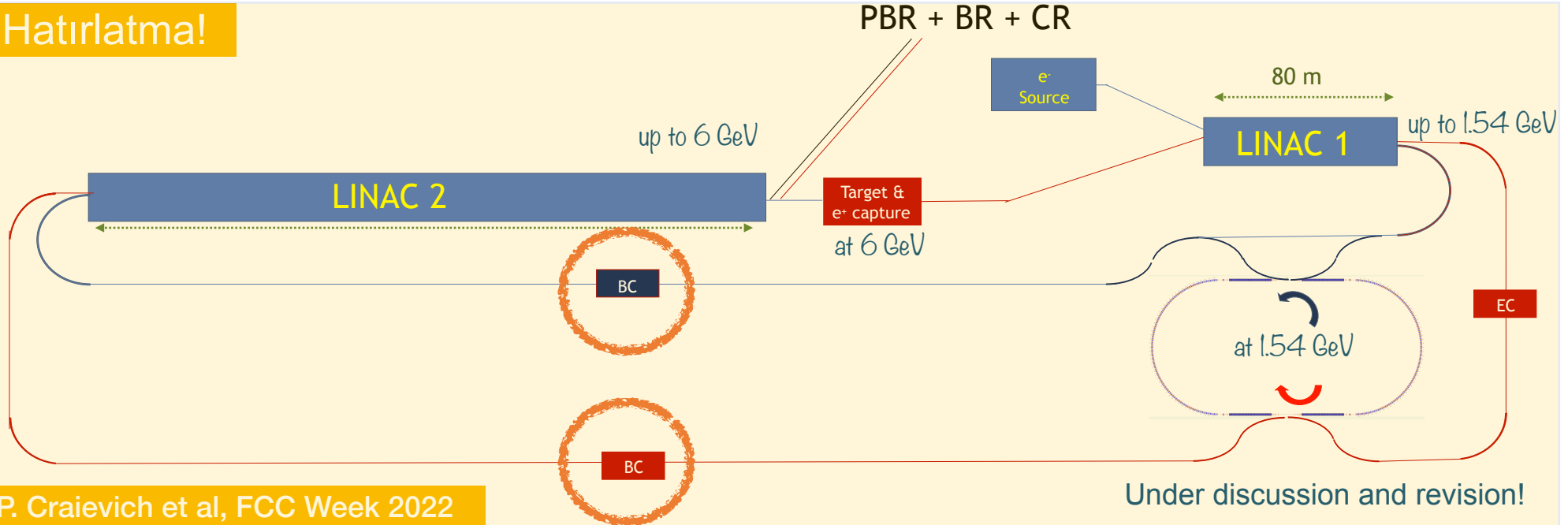
- **Periyodiklik** çembersel bir hızlandırıcı için çok önemlidir. Ancak, transfer hattında periyodiklik şart değildir.
- Farklı hızlandırıcıları birbirine bağlamak veya sabit hedef deneylerine demeti aktarmak için kullanılır.
- Demet parametrelerinin kaybı olabildiğince engellenerek, **twiss** parametrelerinin belli değerlerde **iletilmesi/eşlenmesi** amaçlanır. Başlangıç şartları ile belirlenen bu parametreler, hat boyunca dizilen elemanların transfer matrisleri doğrultusunda değişerek devam eder.





- Demet iletim hatlarını küçümsememek gerekiyor, çünkü bir merkezde geometrik olarak çok uzun hatlar olabiliyor ve içerisinde demeti istenilen özelliklere getirebilmek için, enerji compressor, bunch compressor, spin rotator gibi alt yapılar da bulundurabiliyor.
- Bu durumu CERN'ün yürüttüğü iki büyük proje olan FCC ve CLIC projelerinin kavramsal tasarımlarını inceleyerek anlamaya çalışalım:

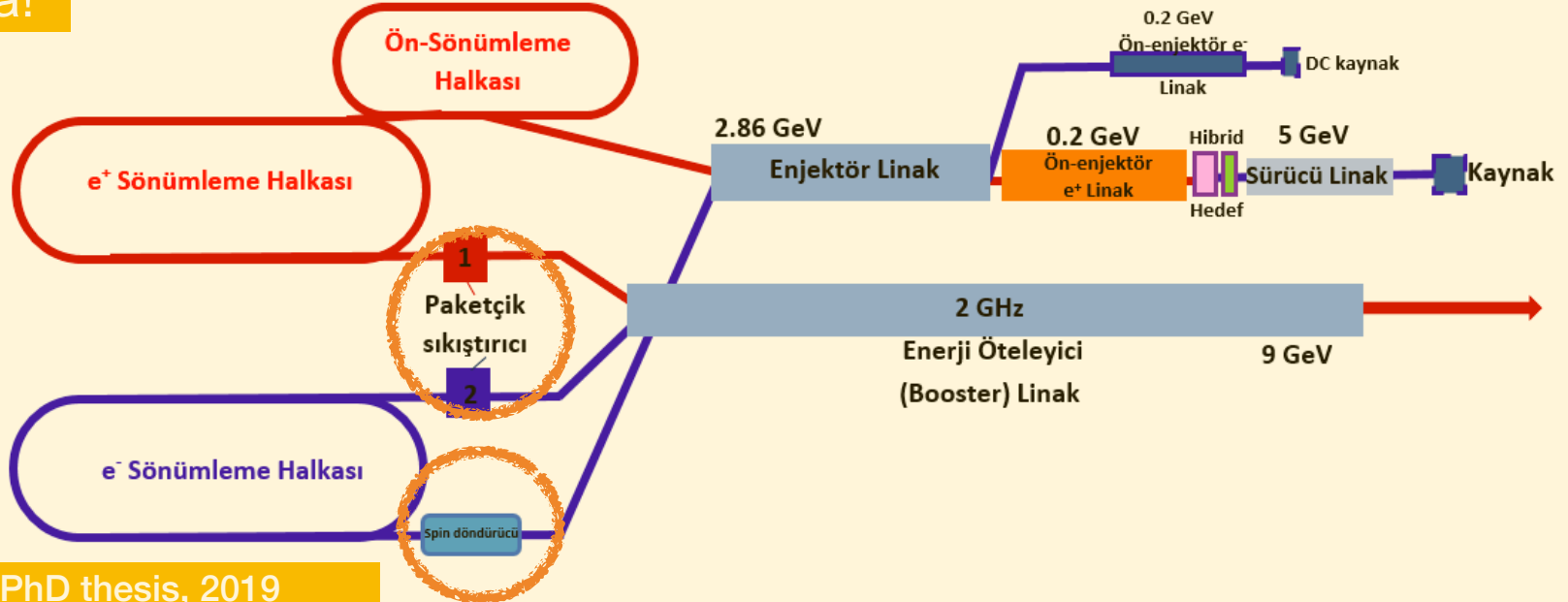
## Hatırlatma!



P. Craievich et al, FCC Week 2022

- Demet iletim hatlarını küçümsememek gerekiyor, çünkü bir merkezde geometrik olarak çok uzun hatlar olabiliyor ve içerisinde demeti istenilen özelliklere getirebilmek için, enerji compressor, bunch compressor, spin rotator gibi alt yapılar da bulundurabiliyor.
- Bu durumu CERN'ün yürüttüğü iki büyük proje olan FCC ve CLIC projelerinin kavramsal tasarımlarını inceleyerek anlamaya çalışalım:

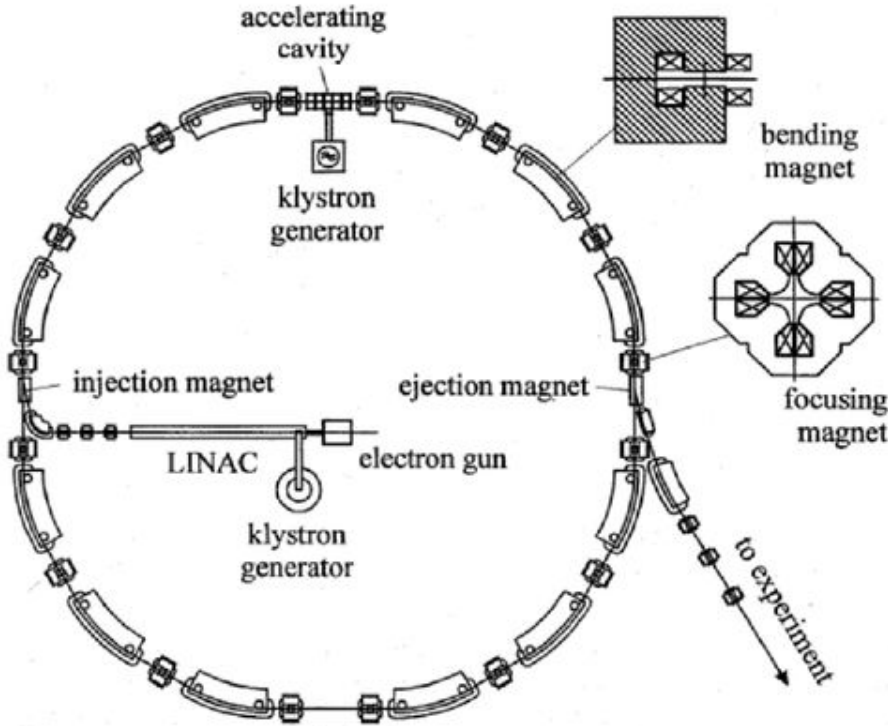
## Hatırlatma!



C. Bayar, PhD thesis, 2019



# Injection and extraction



- Parçacık hızlandırıcı kompleksleri fazlasıyla karmaşık olabilir.
- Demet iletim hatları, olabildiğince düşük kayıplarla parçacıkları hızlandırıcıya almalı (injection) ve belirli süre sonra tekrar çıkarmalıdır (ejection/extraction).
- Bazı durumlarda, hızlandırıcı içerisinde hareket eden demeti etkilemeden gelen demeti vakum haznesine sokmak/çıkarmak gerekir.

P.N. Ostroumov

PHY862 "Accelerator Systems"

- **Enjeksiyon** süreci, bir ön hızlandırıcıdan gelen demeti **olabildiğince az kayıpla** sonraki hızlandırıcıya aktarma işlemidir.
- Dışarıdan gelen bu demet genelde hızlandırıcının kabul alanının dışında kaldığı için bu işlemi gerçekleştirmek için bazı hususlara dikkat etmek gerekir.

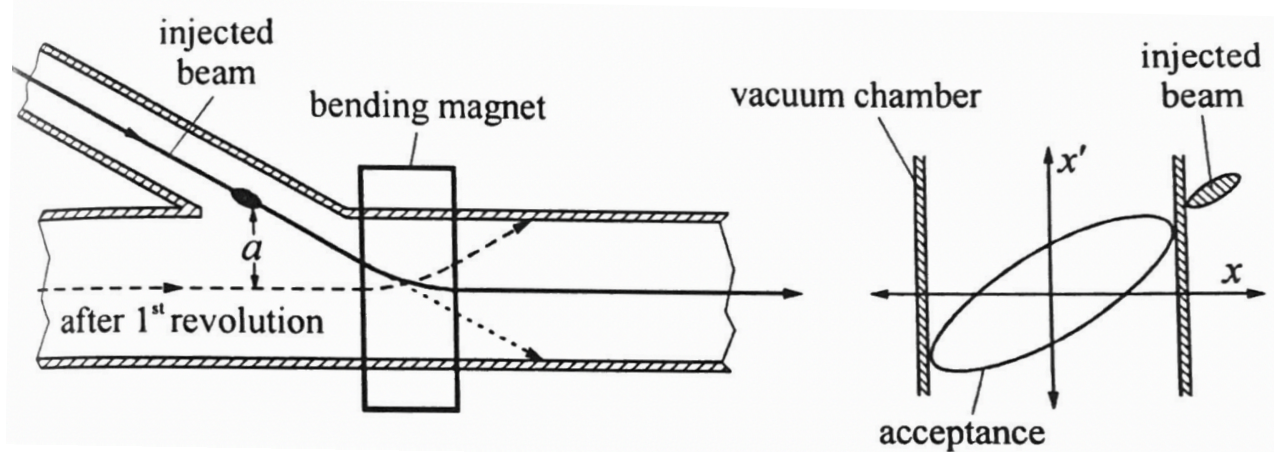


Fig: K. Wille, Oxford press

- Gelen demet, enjeksiyon bölgesinde yörüngeyi aşarak vakum haznesi duvarına çarparak kaybolabilir.
- Bu nedenle, **enjeksiyon bölgesinin hemen arkasına bir bükücü magnet koymak** gerekir.

- Bunun için **kicker** magnet denilen **hızlı atımlı** özel bir magnet kullanılır. Bunun manyetik alanı bir turdan daha kısa sürede ortaya çıkıp sonraki turdaki enjeksiyon sürecinden önce sönmülenir; böylece kayıpsız (mümkün olduğunca) enjeksiyon süreci gerçekleştirilebilir.

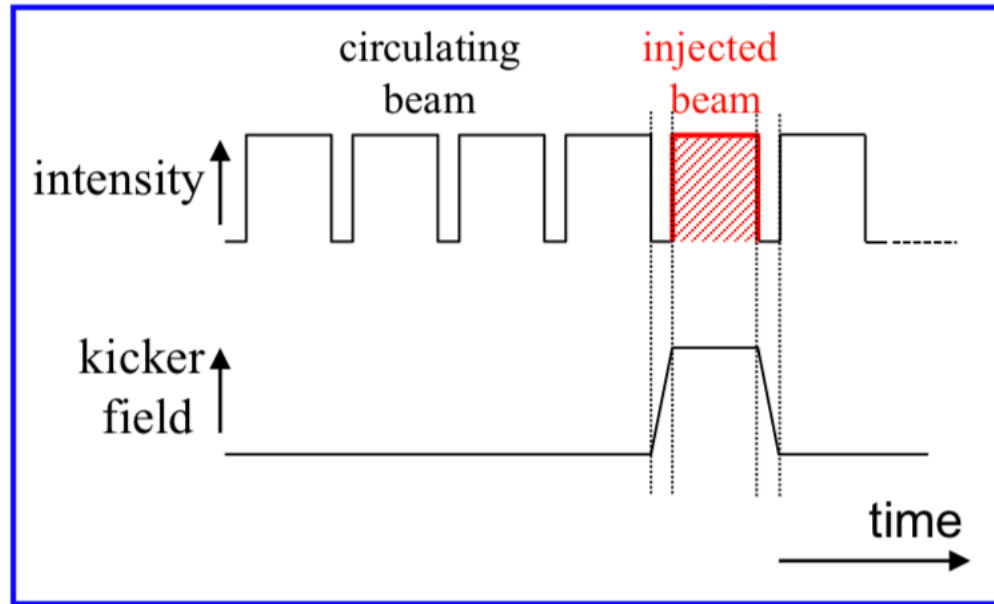


Fig: M.J. Barnes , CAS lecture, 2017

- Yüksek atımlı magnetin alanının çıkış ve iniş süreci: **50 ns** → **bir kaç  $\mu$ s**

- **Hadron için enjeksiyon (by stacking):**

- İki veya üç kicker magnet (güçleri her enjeksiyonda değiştirilen) ile **yerel kapalı orbit çıkıntısı** (local closed orbit bump) oluşturulur.

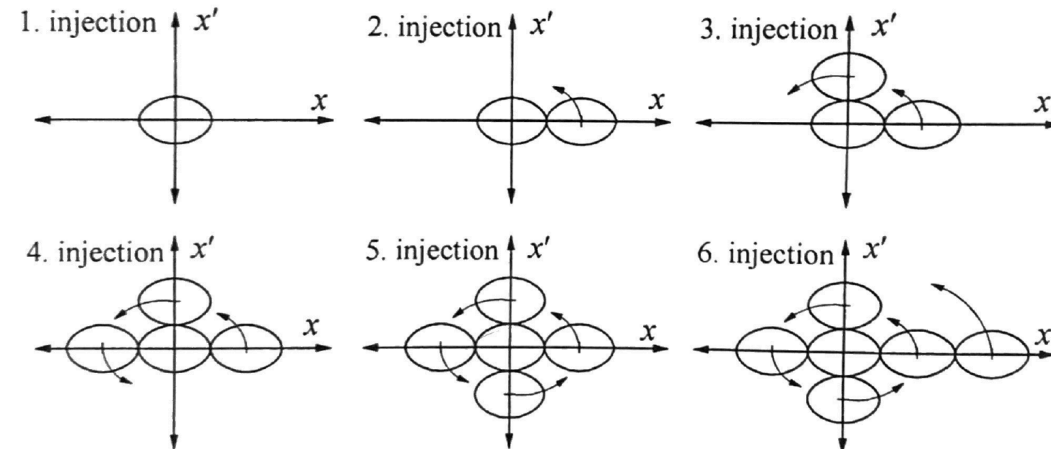
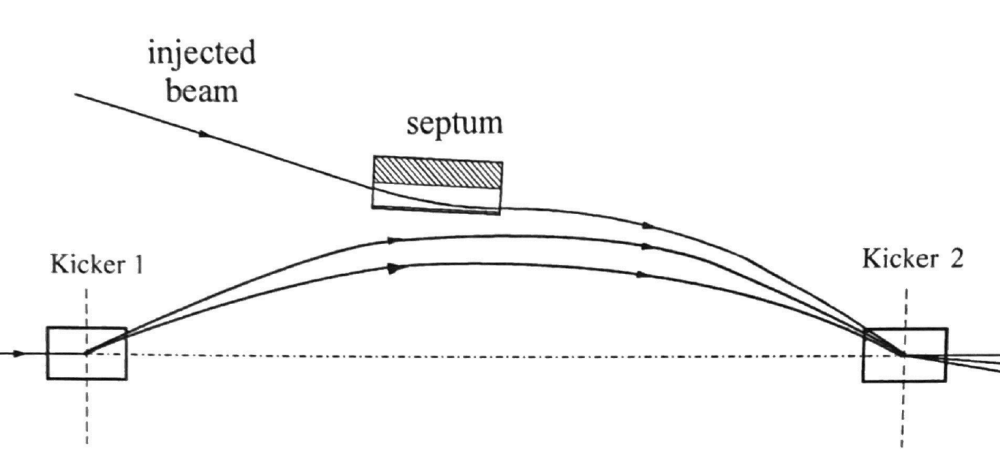


Fig: K. Wille, Oxford press

- **Septum** magnet olarak isimlendirilen bir magnet ile gelen demet yörünge ile paralel hale getirilir, böylece hızlandırıcının kabul bölgesine denk gelmiş olur ve diğer kicker magnet ile yörüngeye yerleşmiş olur.



## • Elektron depolama halkasına enjeksiyon:

- **Elektron** depolama halkalarında, **sinkrotron ışınımından** kaynaklanan elektronun **betatron salınımından sönümlenmesinden** faydalanılır.

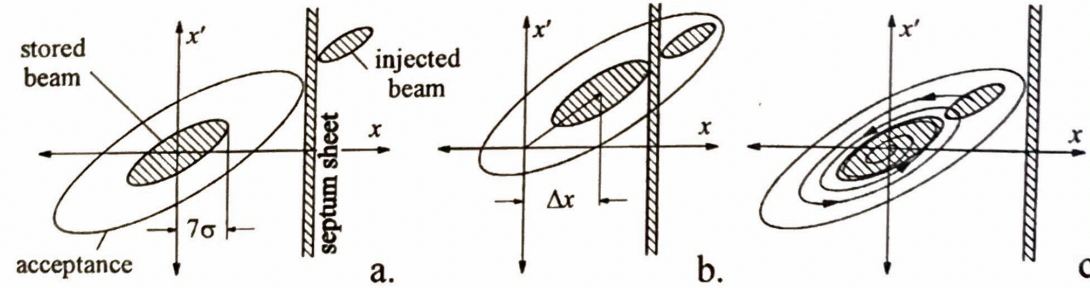
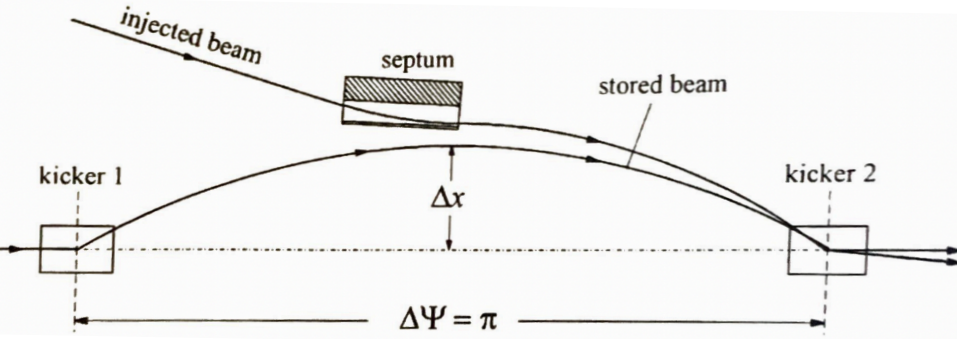
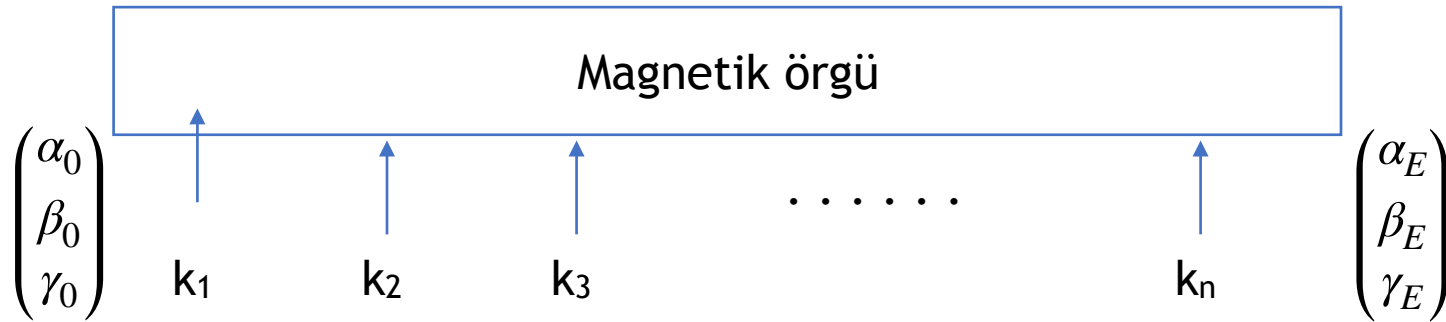


Fig: K. Wille, Oxford press

- Bir kaç sönüm zamanı sonrasında (1 ms - bir kaç 10 ms), **enjekte edilen demet (injected beam)** ileride **dolanana demet (stored beam)** ile birleşir ve **paketçik yoğunluğunu artırır**.
- Bu süreç yüksek akım değerlerine ulaşana kadar, teknik ve fiziği limitler izin verdiği sürece tekrarlanabilir.

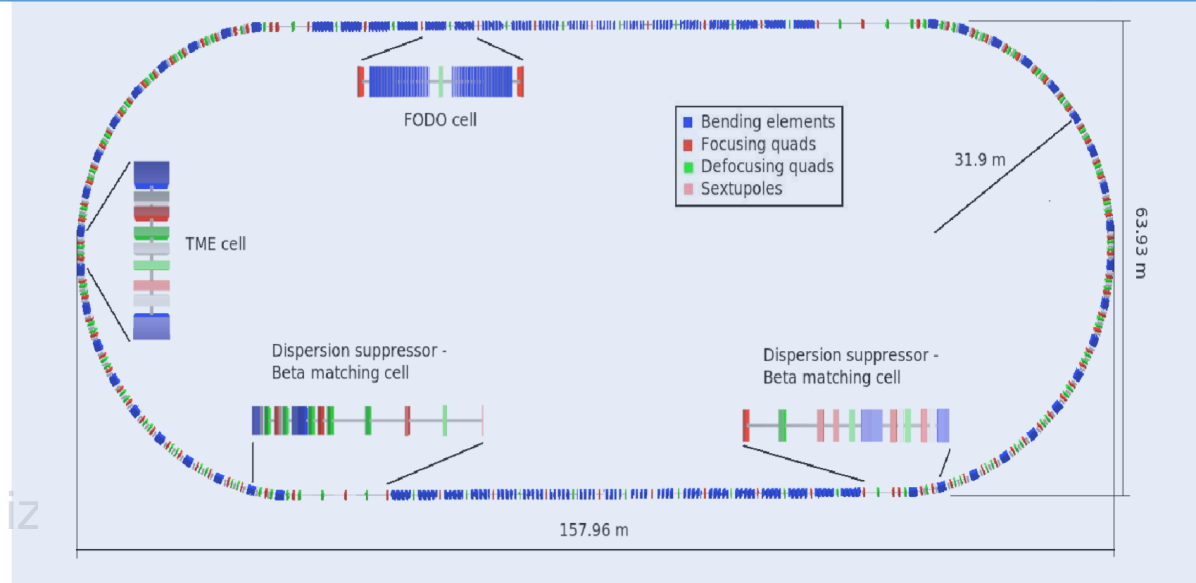


- Manyetik örgü boyunca optik fonksiyonların değişimi **transfer matrisleri** ile hesaplanabilir.
- **Optik fonksiyonların**, manyetik örgü sonunda bazı **özel değerlere ayarlanması** gerekebilir.



- Optik fonksiyonların istenilen değerlere ayarlanabilmesi için yapılan temel iş kuadrupol magnetlerin güçlerinin ve dipole magnet diziliminin ayarlanmasıdır.
- Bu serece demet optiği eşleme denilir.

- Dersin başında söz verdiğim üzere,
  - Bazı parçacık hızlandırıcı merkezlerin anatomisinin incelendi ve ön hızlandırıcı kavramı açıklandı
  - Bazı parçacık kaynaklarının temel prensibi tanıtıldı,
  - Siklotron, Betatron, Miklotron hızlandırıcıları tartışıldı
  - Sinkrotron hızlandırıcısı, kullanılan elektromagnetik elemanlar ve bazı temel terimler anlatıldı
  - Demet iletim hattı ve bünyesinde bulundurabileceği alt bileşenler tanıtıldı
  - Demet enjeksiyonu ve çıkışı (injection and extraction), gerekli ekipmanlar vb. açıklandı.

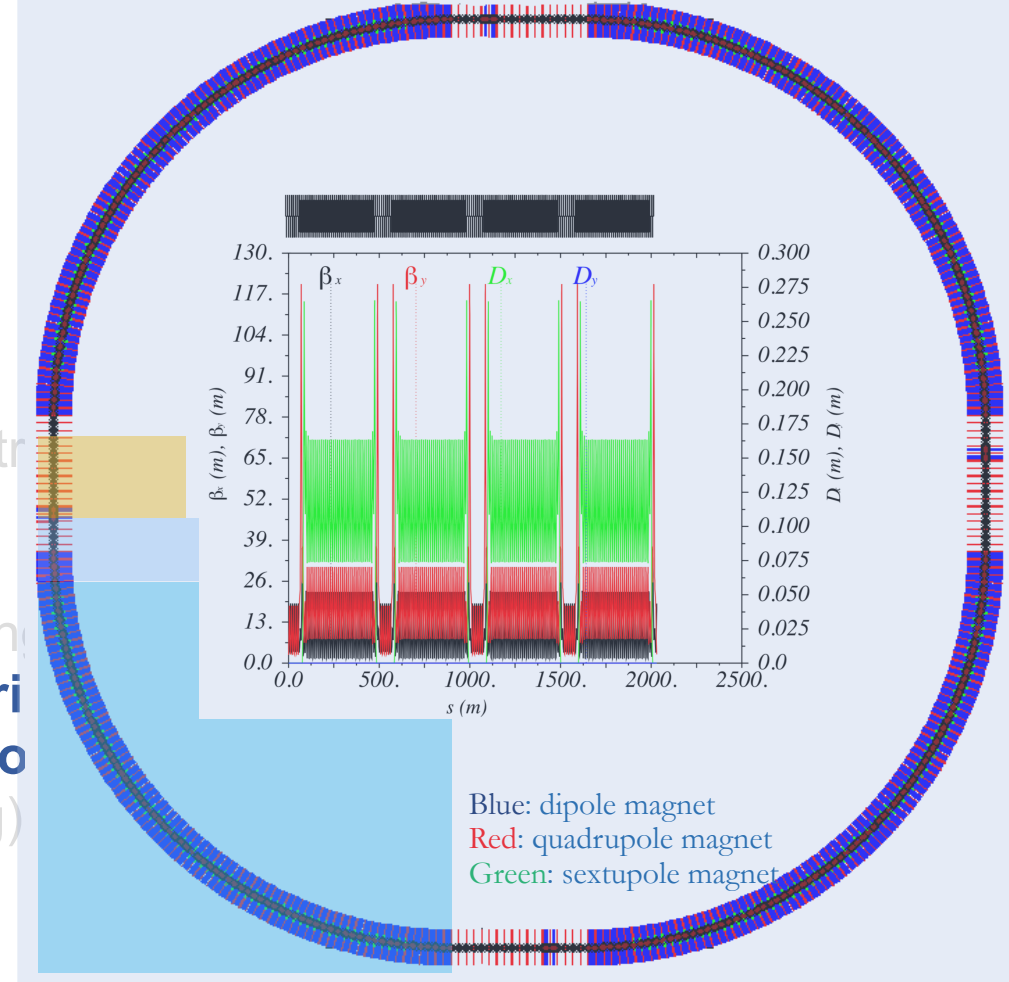


- Betatron
- Mikrotron
- Siklotron (klasik, sinkrosiklotron, iz)
- Sinkrotron (synchrotron)

- Sönümlleme halkası (damping ring)
- Ön sönümlleme halkası (pre-damping ring)
- Enerji öteleyici halkası (booster ring)
- Ön-enerji öteleyici halkası (pre-booster ring)
- Biriktirme halkası (accumulator ring)

# Enerji öteleyici

- Betatron
- Mikrotron
- Siklotron (klasik, sinkrosiklotron, izosiklotron)
- Sinkrotron (synchrotron)
  - Sönümlenme halkası (damping ring)
  - Ön sönümlenme halkası (pre-damping ring)
  - **Enerji öteleyici halkası (booster ring)**
  - **Ön-enerji öteleyici halkası (pre-booster ring)**
  - Biriktirme halkası (accumulator ring)



## ○ Temel parametreler dediğimizde aklımıza ne gelmeli?

- Çevre uzunluğu (circumference)
- Dipol magnet doluluk oranı (filling factor)
- Tur başına enerji kaybı (energy loss per turn)
- Sönüm zamanı (damping time)
- Enerji yayılımı (energy spread)
- Paketçik uzunluğu (bunch length)
- Momentum sıkışıklık faktörü (momentum compaction factor)
- Faz uzayı temsili ve emittans (phase space and emittance)
- Kromatiklik (chromaticity)
- Enerji kabulü (energy acceptance, RF acceptance, longitudinal acceptance)
- Sinkrotron ışınım integralleri (synchrotron radiation integrals)
- Faz ilerlemesi (phase advance)
- Dinamik aralık (dynamic aperture)
- RF parametreleri
- Betatron ayarı (betatron tune)
- Sinkrotron ayarı (synchrotron tune)
- Harmonik number (harmonic number)
- ...

# Magnetler

- Hızlandırıcı tasarımında kullanılan **elektromanyetik elemanlar** dediğimizde aklımıza ne gelmeli?

- Bükücü magnet (dipole magnet) ✓
- Odaklayıcı magnet (quadrupole magnet) ✓
- Sekstupol magnet (sextupole magnet) ✓
- RF kavite (RF cavity) ✓
- Düzeltici magnet (corrector magnets)
- Kicker magnet ✓
- Septum magnet ✓
- Demet görüntüleme cihazı (beam position monitor)
- Manyetik eklenti aracı (insertion device):
  - Normal sönüm magneti (damping wiggler magnet)
  - Robinson sönüm magneti (Robinson wiggler magnet)
- ...



# Emittans

- Şimdiye kadar birçok parametre öğrendiğiniz, bu derste de öğrenmeye devam edeceğiz. Bu kısımda, hem farklı dairesel hızlandırıcıların anlaşılması hem de en önemli parametrelerden biri olan emittansın pekiştirilmesi için, farklı hızlandırılarda emittans tartışması yapacağız.

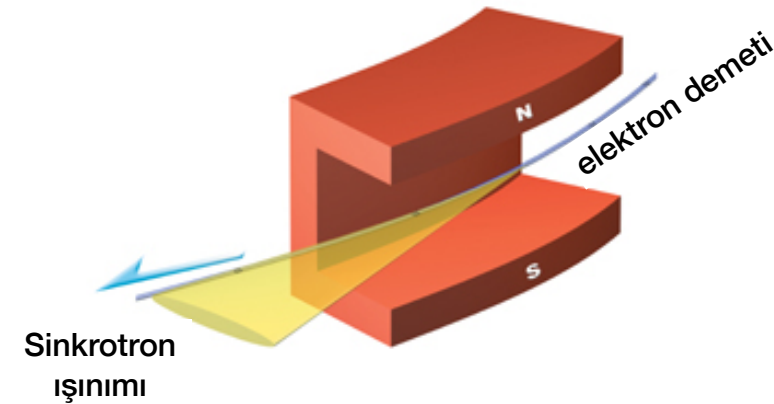
● **Sinkrotron ışınımı:** Yüklü bir parçacık ivmeli hareket altında ışınım yayar:  
- Bu durum, hafif parçacıkların demet özellikleri üzerinde güçlü etkilere neden olabilir.

- Karakteristik Sönüm zamanı ile emittans'ta azalmaya neden olur.

$$\epsilon = \epsilon_0 e^{-t/\tau}$$

- Sinkrotron ışınımı yüzünden enerji kaybına neden olur: **tur başına enerji kaybı**

- **Emittans, enerji yayılımı** gibi önemli parametreler sinkrotron ışınımı ile değişikliğe uğrar.



Hatırlatma!

- **Sinkrotron ışınımı:** Yüklü bir parçacık ivmeli hareket altında ışınım yayar:
  - Bu durum, hafif parçacıkların demet özellikleri üzerinde güçlü etkilere neden olabilir.

- Işınım yayan demetin dinamiğini ifade etmek için **beş sinkrotron ışınım integral tanımlanır.:**

$$\epsilon_0 = c_q \gamma^2 \frac{I_5}{J_x I_2} \quad \text{denge emittansı}$$

$$\sigma_\delta^2 = c_q \gamma^2 \frac{I_3}{J_z I_2} \quad \text{denge enerji yayılımı}$$

$$\tau_x = 2 \frac{E_0}{U_0 J_x} T_0 \quad \text{sönüm zamanı}$$

$$U_0 = \frac{c_\gamma}{2\pi} E^4 I_2 \quad \text{tur başına enerji kaybı}$$

$$I_1 = \oint \frac{\eta_x}{\rho} ds \quad I_2 = \oint \frac{1}{\rho^2} ds \quad I_3 = \oint \frac{1}{\rho^3} ds$$

$$I_4 = \oint \frac{\eta_x}{\rho^3} \left( \frac{1}{\rho^2} + 2k_1 \right) ds \quad I_5 = \oint \frac{\mathcal{H}_x}{\rho^3} ds$$

$$J_x = 1 - \frac{I_4}{I_2} \quad J_y = 1 \quad J_z = 2 + \frac{I_4}{I_2}$$

- Klasik elektromanyetik teoriye göre yüklü bir **parçacık ivmeli hareket** sırasında  **Radyasyon (ışınım) yayar**. Çembersel hızlandırıcılarda ise dipol magnetin içerisinde hareket eden parçacığın hızının yönündeki değişime karşılık gelen ivmeli hareketten kaynaklanan ışınım çok yüksek olabilir. Bu ışınım, demet özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir.
- **Tur başına enerji kaybının** (energy loss per turn) hesaplanması için sinkrotron ışınım gücünün (synchrotron radiation power) bir dolanım boyunca integrali alınmalıdır.

$$U_0 = \oint P_\gamma dt$$

$$P_\gamma = \frac{2}{3} r_c m c^3 \frac{\beta^4 \gamma^4}{\rho^2} = \frac{c C_\gamma E^4}{2\pi \rho^2}$$

$$C_\gamma = \frac{4\pi}{3} \frac{r_0}{(m c^2)^3} = 1.41733 \times 10^{-14} \text{ m s W / (GeV)}^4 = 8.8460 \times 10^{-5} \text{ m / (GeV)}^3$$

$$U_0 = P_\gamma \frac{2\pi\rho}{\beta c} = \frac{4\pi}{3} r_c m c^2 \beta^3 \frac{\gamma^4}{\rho}$$

$$U_0 = C_\gamma \frac{E^4 [\text{GeV}]}{\rho [\text{m}]}$$

- Klasik elektromanyetik teoriye göre yüklü bir **parçacık ivmeli hareket** sırasında  **Radyasyon (ışınım) yayar**. Çembersel hızlandırıcılarda ise dipol magnetin içerisinde hareket eden parçacığın hızının yönündeki değişime karşılık gelen ivmeli hareketten kaynaklanan ışınım çok yüksek olabilir. Bu ışınım, demet özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir.
- **Tur başına enerji kaybının** (energy loss per turn) hesaplanması için sinkrotron ışınım gücünün (synchrotron radiation power) bir dolanım boyunca integrali alınmalıdır.

$$P_{\gamma} = \frac{cC_{\gamma} E^4}{2\pi \rho^2}$$

$$C_{\gamma} = \frac{4\pi}{3} \frac{r_0}{(mc^2)^3} = 8.8460 \times 10^{-5} m / (GeV)^3$$

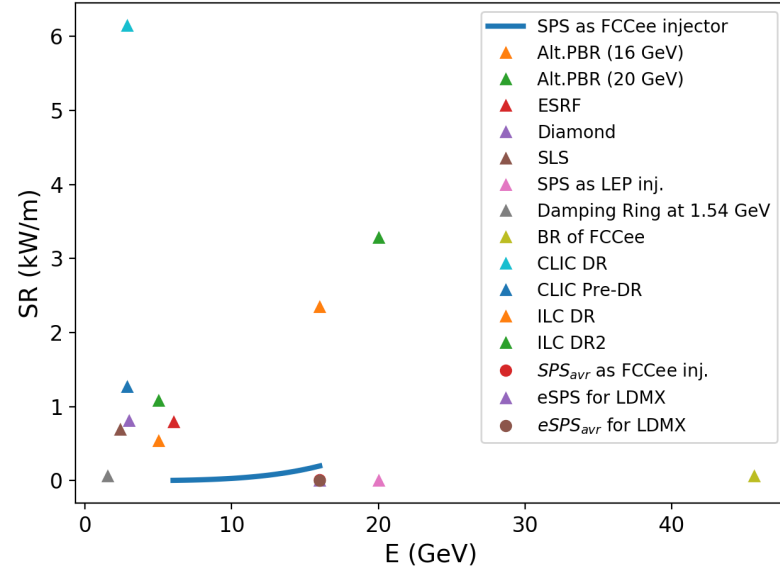
$$U_0 = C_{\gamma} \frac{E^4 [GeV]}{\rho [m]}$$

$$P_{\gamma} = \frac{2}{3} \alpha \hbar c^2 \frac{\gamma^4}{\rho^2}$$

$$\alpha = 1/137$$

$$\hbar c = 197 MeV \cdot fm$$

$$U_0 = \frac{4\pi}{3} \alpha \hbar c \frac{\gamma^4}{\rho}$$

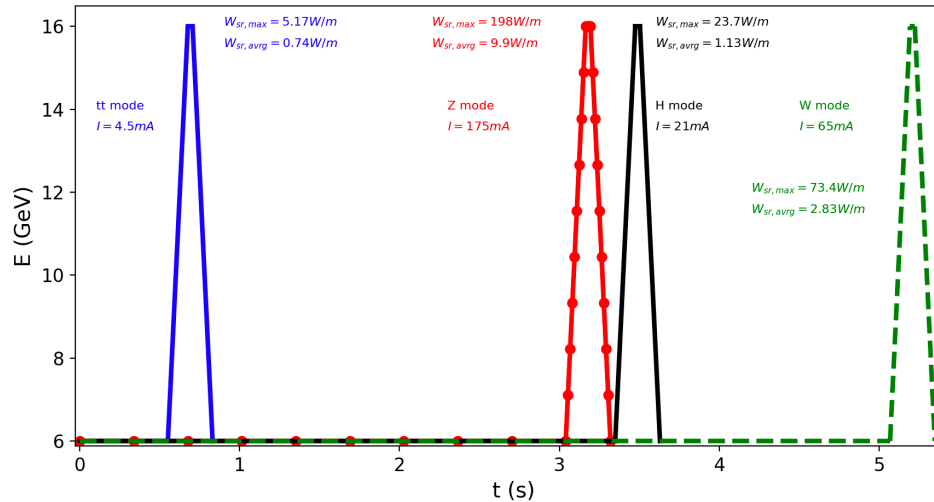


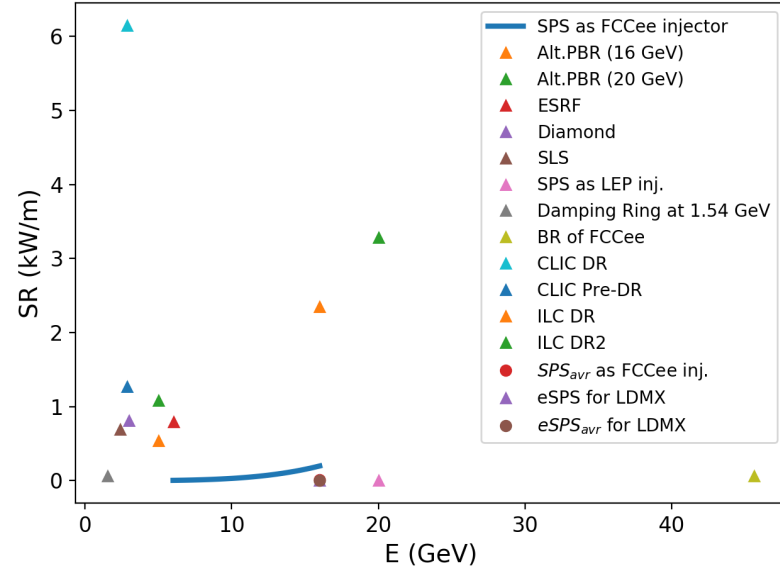
- Sinkrotron ışınımı vakum haznesine nüfuz ederek vakum basıncında bozulmaya neden olabilir

- **Sinkrotron ışınımı gücü**, tur başına enerji kaybı ( $U_0$ ), demet akımı ( $I_{tot}$ ) ile doğru ve çevre uzunluğu ( $C$ ) ile ters orantılıdır:

$$P_{sr} [W/m] = \frac{U_0[eV] \cdot I_{tot}[A]}{C[m]}$$

- Sinkrotron ışınım gücü değerlendirmeleri, projenin erken aşamalarında düşünülmelidir.





- Sinkrotron ışınımı vakum haznesine nüfuz ederek vakum basıncında bozulmaya neden olabilir

- **Sinkrotron ışınımı gücü**, tur başına enerji kaybı ( $U_0$ ), demet akımı ( $I_{tot}$ ) ile doğru ve çevre uzunluğu ( $C$ ) ile ters orantılıdır:

$$P_{sr} [W/m] = \frac{U_0[eV] \cdot I_{tot}[A]}{C[m]}$$

- Sinkrotron ışınım gücü değerlendirmeleri, projenin erken aşamalarında düşünülmelidir.

Parameters	SPS for LEP	SPS for FCC
Extraction energy [GeV]	20	16
SR due to dipole magnets only(W/m)	1.85	198
Average SR due to dipole magnets	0.024	8.1
SR due to dipole and damping wiggler	-	809
Average SR due to dipole and	-	107
Beam current (mA)	0.45	7-160



- Yüklü parçacıkların ivmeli hareketinden dolayı oluşan sinkrotron ışınımı, **betatron salınımı** ve **sinkrotron salınımında** daralmaya neden olur ve bu salınımlar için bir **sönüm zamanı** (damping time) söz konusu olur.

$$x(s) = \sqrt{\epsilon} \sqrt{\beta(s)}$$

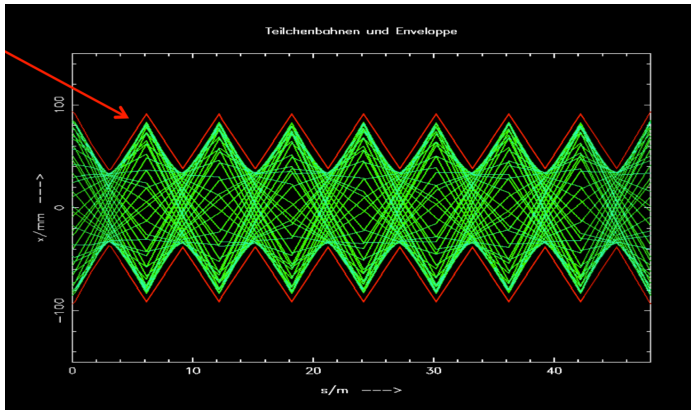


Fig: B. Holzer, 2016 CAS lecture

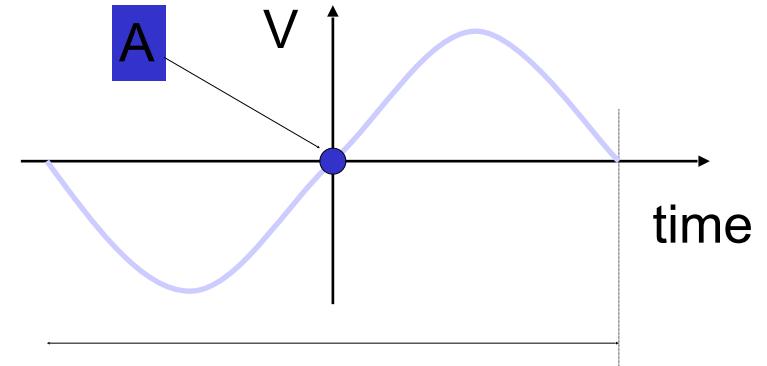


Fig: F. Tecker, 2016 CAS lecture

$$\tau_x = \frac{2E}{J_x U_0} T_0$$

$$\tau_y = \frac{2E}{J_y U_0} T_0$$

$$\tau_z = \frac{2E}{J_z U_0} T_0$$

$$J_x = 1 - \frac{I_4}{I_2}$$

$$J_y = 1$$

$$J_z = 2 + \frac{I_4}{I_2}$$

$$J_x + J_y + J_z = 4$$

(Robinson teoremi)

# Paketçik uzunluğu

- Çembersel hızlandırıcı içerisindeki bir paketçik içerisindeki parçacıklar farklı zamanlarda (enerji yayılımından dolayı) RF hızlandırma elemanına girer ve **sinkrotron salınımı** hareketi sergiler. Böylece, paketçik içerisindeki parçacıklar, bir referans noktası (parçacığı) civarında bu salınım hareketini sergilerken, paketçiğin **boyuna bir dağılımı** olmasına neden olur. Bu boyuna dağılıma **paketçik uzunluğu** (bunch length) denir. Paketçik uzunluğu ile enerji yayılımı arasında sıkı bir ilişki bulunmaktadır
- Çembersel hızlandırıcılarda, paketçik uzunluğunun hesaplanması, enerji yayılımı ile de ilişkili olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\sigma_s = \sigma_\delta C \left( \frac{\alpha_c E}{2\pi h (eV_0^2 - U_0^2)} \right)^{(1/2)}$$

Çevre uzunluğu

Momentum sıkışıklık faktörü

Enerji

Enerji yayılımı

Harmonik sayısı

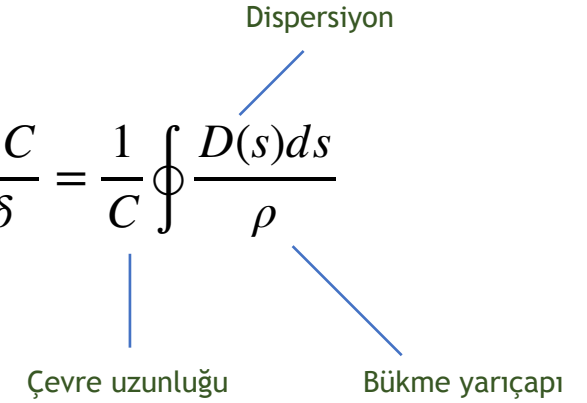
RF Voltajı

Tur başına enerji kaybı

- Çembersel hızlandırıcı içerisinde dispersiyonun varlığında (dipol magnetin doğal sonucu), daha evvelde açıklandığı gibi referans parçacığına göre dipol magnete belirli **enerji yayılımı** ile giren parçacıklar **farklı yörüngeler** izler. Enerjiye bağımlı bu değişim, özellikle **boyuna dinamikte** önemli bir parametredir. Momentum yayılımına karşılık gelen parçacığın çembersel hızlandırıcı boyunca takip ettiği **yörünge farkı**, **momentum sıkışıklık faktörü** (momentum compaction factor) olarak isimlendirilir.

$$\Delta C = \left( \oint \frac{D(s)}{\rho} ds \right) \delta$$

$$\alpha_c = \frac{1}{C} \frac{d\Delta C}{d\delta} = \frac{1}{C} \oint \frac{D(s) ds}{\rho}$$



- **FODO** hücresi için daha bait bir halde yazılabilir;

$$\alpha_c \approx \frac{(D_F + D_D)\theta}{2L} \approx \frac{\theta^2}{\sin\phi/2} \approx \frac{1}{Q_x^2}$$

- Hızlandırıcı fiziğinde çok defa kullanılan **faz uzayı** (phase space) grafikleri, eksenleri farklı dinamik değişkenlerine karşılık gelen iki boyutlu uzay olarak tanımlanabilir Bir demet, faz uzayında **dağılmış parçacıklardan** oluşur. Parçacıkların, faz uzayında (konum-momentum) kapladıkları **alana emittans** (emittance) denir.
- Parçacıklar, hızlandırıcı içerisinde hareket ederken, faz uzayı şekli değişebilse de **faz uzayı alanı sabit** kalır. Faz uzayındaki parçacık yoğunluğu korunumu **Liouville** teoremi olarak bilinir. Bu teorem, korunumlu kuvvetler altında faz uzayındaki parçacık yoğunluğunun değişmediğini ifade eder.

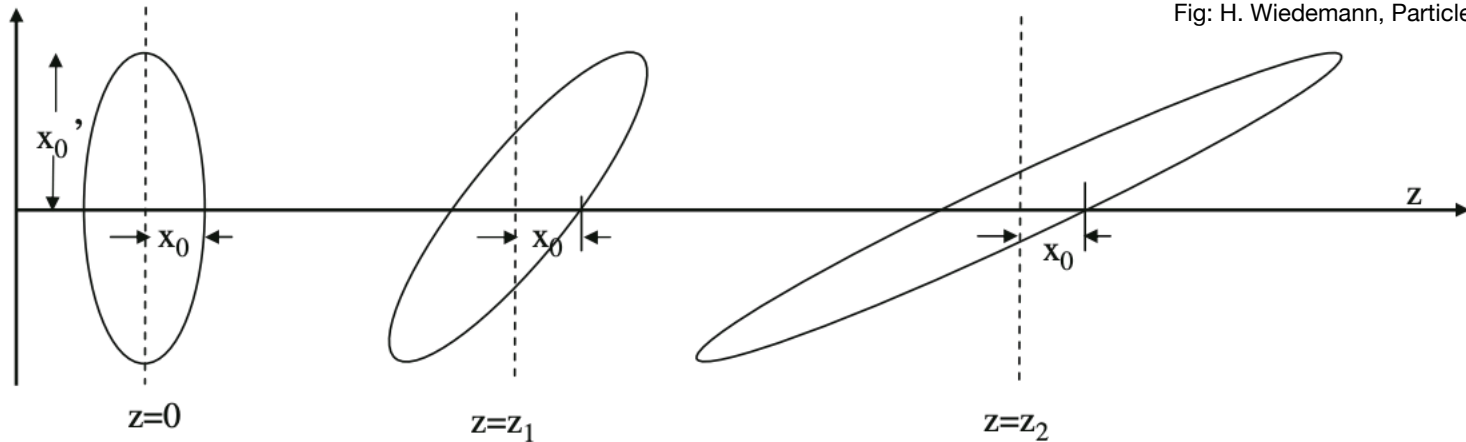


Fig: H. Wiedemann, Particle accelerator physics

Transformation of a phase space ellipse at different locations along a drift section

- Hızlandırıcı fiziğinde çok defa kullanılan **faz uzayı** (phase space) grafikleri, eksenleri farklı dinamik değişkenlerine karşılık gelen iki boyutlu uzay olarak tanımlanabilir. Bir demet, faz uzayında **dağılmış parçacıklardan** oluşur. Parçacıkların, faz uzayında (konum-momentum) kapladıkları **alana emittans** (emittance) denir.
- Parçacıklar, hızlandırıcı içerisinde hareket ederken, faz uzayı şekli değişebilse de **faz uzayı alanı sabit** kalır. Faz uzayındaki parçacık yoğunluğu korunumu **Liouville** teoremi olarak bilinir. Bu teorem, korunumlu kuvvetler altında faz uzayındaki parçacık yoğunluğunun değişmediğini ifade eder.
- Bu teoremde, parçacık yoğunluğunun **sürekli bir dağılımda** olduğu ve sinkrotron ışınımı yaymadığı varsayılır. Parçacıkların sürekli bir dağılım olarak ifade edilmesi durumunda, **yüklerinden dolayı etkileşmesi** görmezden gelinmiş olur.
- Gerçek bir demette ise parçacıkların birbirlerine fazlasıyla yaklaşmasından ötürü oluşan Coulomb kuvveti sürekli dağılım için hesaplanan kuvvetten daha büyük olur. Ayrıca özellikle leptonların çembersel bir hızlandırıcıda olması durumunda, sinkrotron ışınımı da hesaba katılmalıdır. **Liouville** teoremi enerji kaybı olan sistemlerde **geçerli değildir**.

## Emittans derken neyi kastediyoruz?

- Giriş emittansı (injected emittance)
- Denge emittansı (equilibrium emittance)
- Çıkış emittansı (extraction emittance)
- Geometrik emittans (geometric emittance)
- Normalize emittans (normalized emittance)
- ...



# Emittans

- Doğrusal bir hızlandırıcıda demet emittansının gelişimi adyabatik sönüm (adiabatic damping) tarafından belirlenir. İvmeli hareket sınırlı olduğu için sinkrotron ışınımı ihmal edilebilir.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{\gamma'}{\gamma}\varepsilon$$

Adyabatik sönüm

- Depolama halkasında (storage ring) veya sönümlenme halkasında (damping ring) demet emittansının gelişimi sinkrotron ışınımı (SI) ve kuantum uyarımı (quantum excitation) ile belirlenir (hafif parçacıklarda, enerji sabit).

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{2}{\tau}\varepsilon + \frac{2}{\tau}\varepsilon_{eq}$$

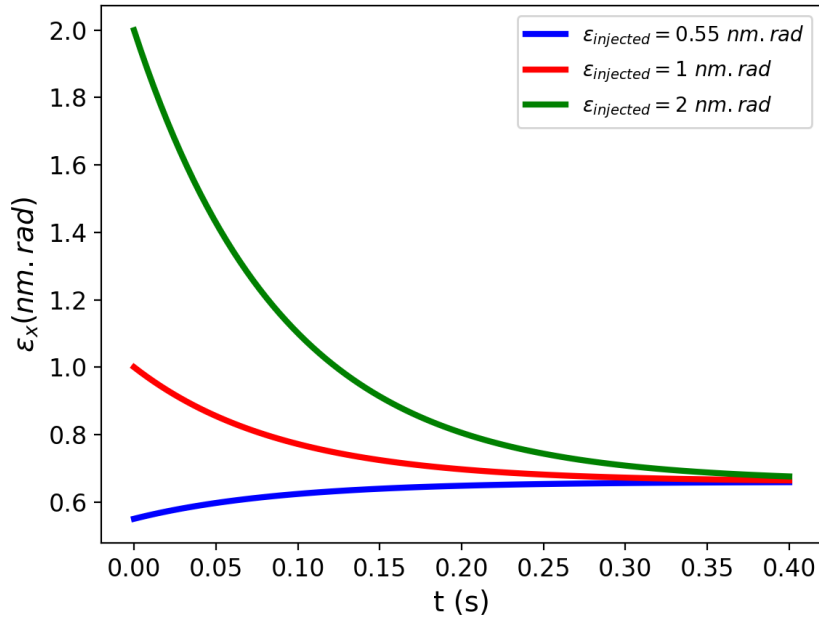
SI sönümü ve  
kuantum uyarımı

- Enerji öteleyici halkalarda demet emittansının gelişimi adyabatik sönüm, sinkrotron ışınımı ve kuantum uyarım ile belirlenir (hem enerji artışı hem ışınım söz konusu).

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{\gamma'}{\gamma}\varepsilon - \frac{2}{\tau}\varepsilon + \frac{2}{\tau}\varepsilon_{eq}$$

Adyabatik ve SI sönümü,  
kuantum uyarımı

- Enerji öteleyici halkalarda **demet emittansının gelişimi** **adyabatik sönüm**, **sinkrotron ışınımı** ve **kuantum uyarım** ile belirlenir.



~~$$\frac{d\epsilon_x}{dt} = -\frac{\gamma'}{\gamma} \epsilon_x - \frac{2}{\tau_x} \epsilon_x + \frac{2}{J_x \tau_x} C_q \gamma^2 \frac{I_5}{I_2}$$~~

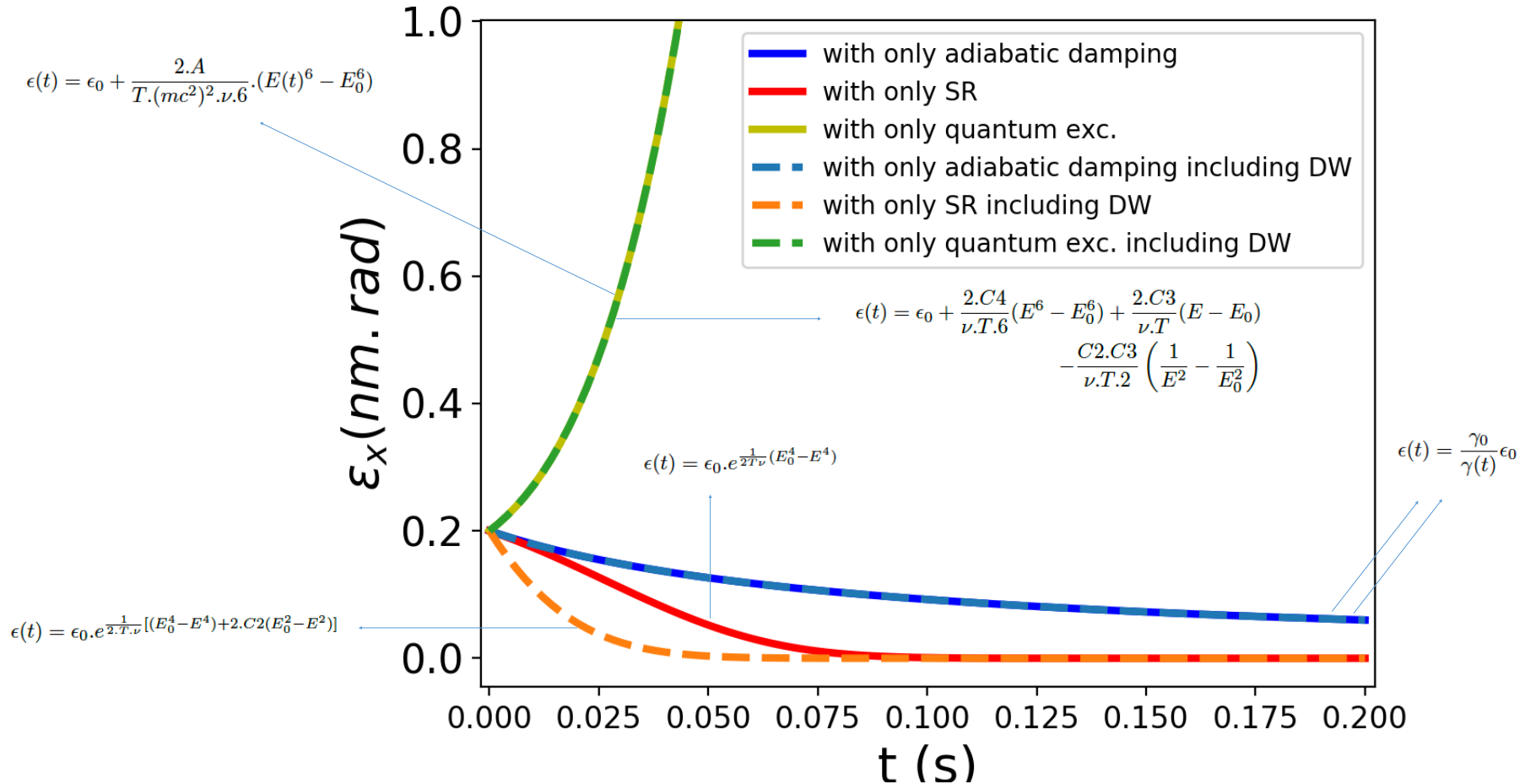
Eğer enerji değişimi yoksa, bu diferansiyel denklemin çözümü aşağıdaki gibi basitleşir:

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \cdot e^{-\frac{2t}{\tau}} + \epsilon_{eq} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2t}{\tau}}\right)$$

- Enine emittans giriş emittansından bağımsız olarak, sinkrotron ışınımı ve kuantum uyarımın etkisi ile, bir kaç sönüm zamanı sonrasında denge durumuna ulaşır.

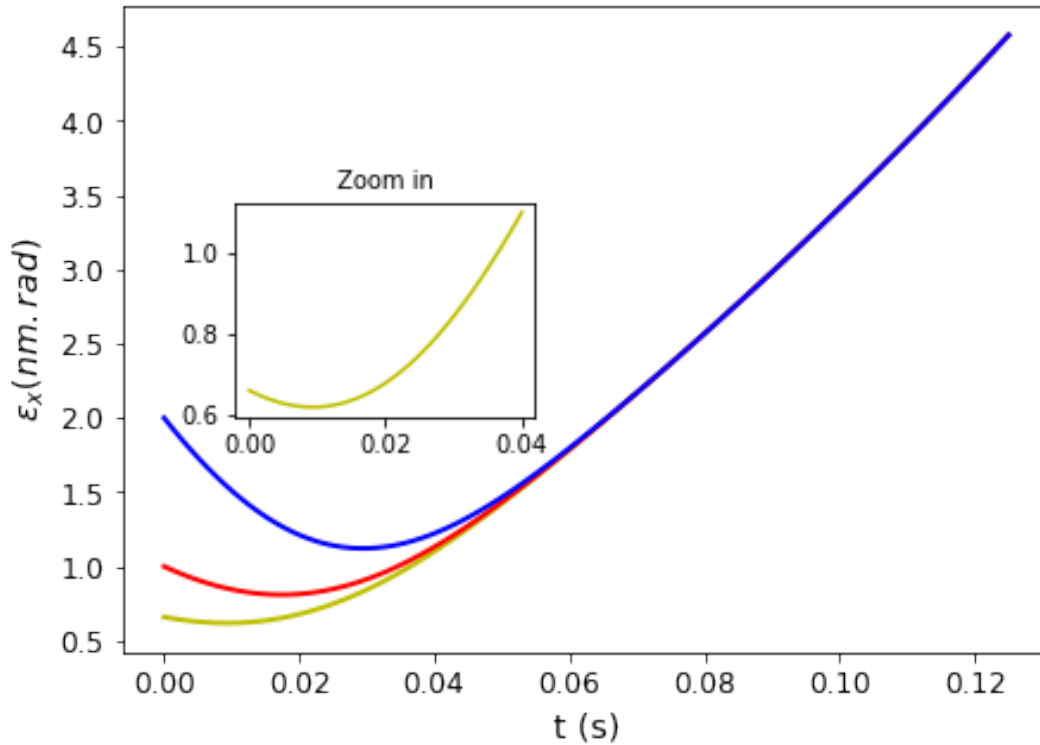
# Emittans

- Bahsi geçen etkiler ve gösterilen diferansiyel denklem altında emittansın hareketini görmeden evvel etkilere tek tek bakalım.



# Emittans

- Enerji öteleyici halkalarda **demet emittansının gelişimi** **adyabatik sönüm**, **sinkrotron ışınımı** ve **kuantum uyarım** ile belirlenir.



$$\frac{d\epsilon_x}{dt} = -\frac{\gamma'}{\gamma}\epsilon_x - \frac{2}{\tau_x}\epsilon_x + \frac{2}{J_x\tau_x}C_q\gamma^2\frac{I_5}{I_2}$$

- Başlangıçta, emittansın gelişimi SI ve adyabatik sönüm hakimiyetindeyken en küçük emittans değerine ulaşılmış
- Sonrasında kuantum uyarımının etkisi ağır basmaya başlamış
- Sonrasında, emittans kuantum uyarımın etkisiyle artmıştır

# Kabul (acceptance)

- Bir hızlandırıcı tasarımının **amacı** (çoğu zaman) bir önceki hızlandırıcıdan gelen demeti **kabul** etmek, demetin **enerjisini artırmak** veya **sabit tutmak** ve sonraki hızlandırıcı için gerekli **demet karakteristiğini** sağlayarak demetin çıkışını sağlamak.
  - Dairesel bir hızlandırıcıda bir önceki hızlandırıcıdan gelen demetin kabul edilmesi (minimum kayıpla) en önemli hedeflerden biridir.
  - Demetin kabul edilmesi derken neyi kastediyoruz?
    - Boyuna kabul (longitudinal acceptance, RF acceptance, energy acceptance),
    - Enine kabul (transverse acceptance, dynamic aperture)
    - Mekanik kabul (mechanical aperture, beam stay clear)

Şimdi sırasıyla bu konuları irdeleyelim...

# Enerji Kabulü

Halen kararlı sinkrotron salınımı yapabilen **maksimum enerji sapmasının** sınırına halkanın **enerji kabulü** (energy acceptance) denir. Buna, momentum kabulü, RF kabulü, boyuna kabul de denir.

$$\left(\frac{\delta E}{E}\right)^2 = \left[ \frac{qV}{\pi h \alpha_c E_0} ((2\cos\phi_s) + (2\phi_s - \pi)\sin\phi_s) \right]$$

$$\phi_s = \arcsin\left(\frac{U_0}{V_0}\right)$$

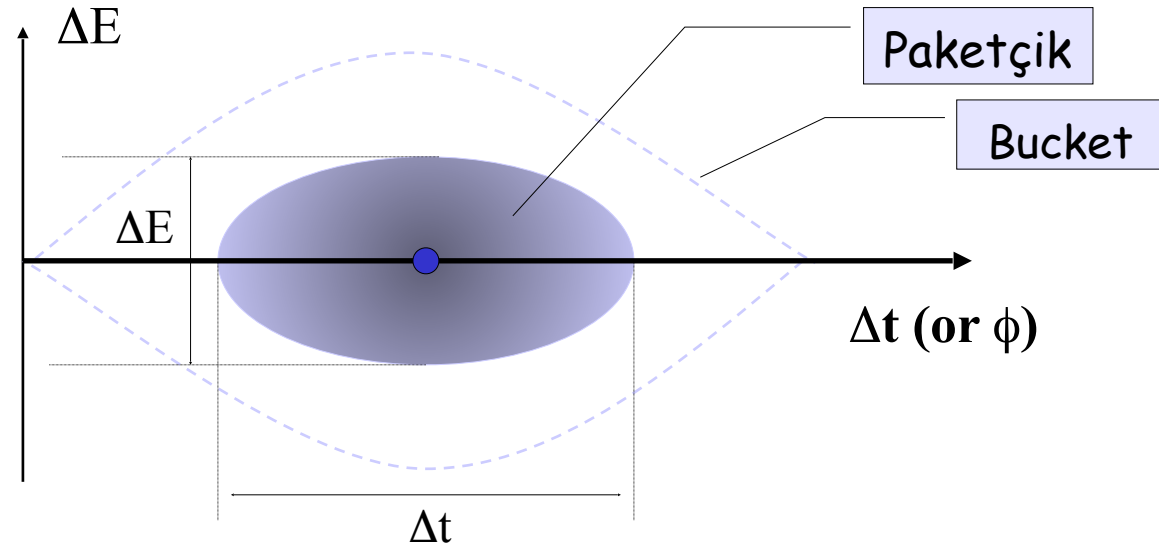


Fig: F. Tecker, 2016 CAS lecture

Böylece enerji kabulü, diğer tüm parametreler çoğunlukla başka nedenlerde belirlendiğinden, RF voltajı ile kontrol edilebilir.

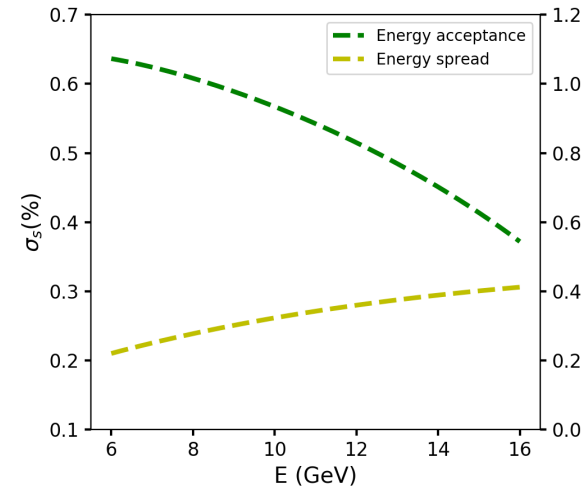
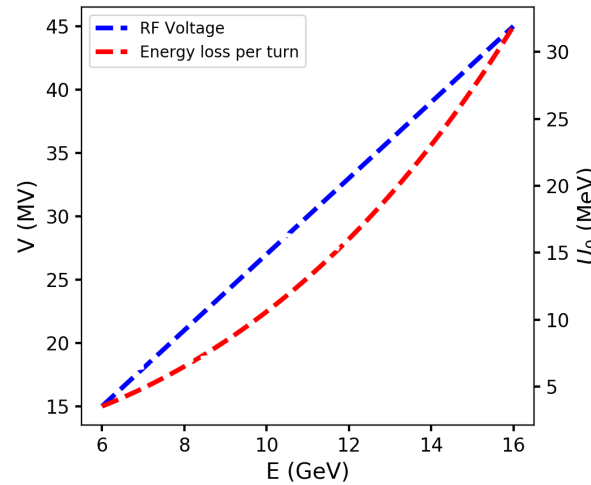


# Enerji Kabulü

Halen kararlı sinkrotron salınımı yapabilen **maksimum enerji sapmasının** sınırına halkanın **enerji kabulü** (energy acceptance) denir. Buna, momentum kabulü, RF kabulü, boyuna kabul de denir.

$$\left(\frac{\delta E}{E}\right)^2 = \left[ \frac{qV}{\pi h \alpha_c E_0} ((2\cos\phi_s) + (2\phi_s - \pi)\sin\phi_s) \right]$$

$$\phi_s = \arcsin\left(\frac{U_0}{V_0}\right)$$

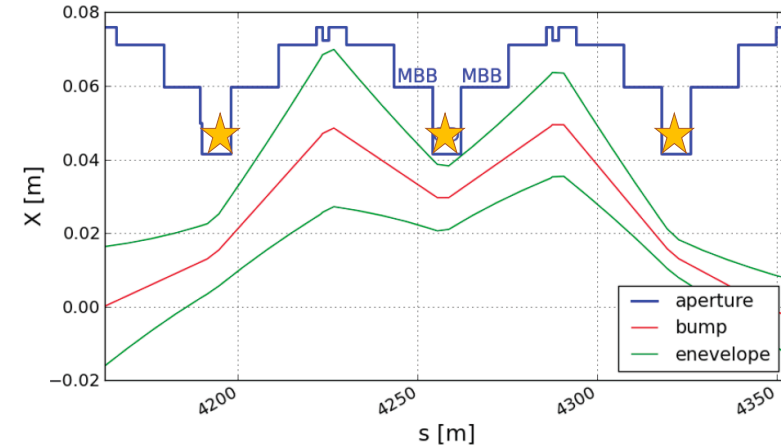
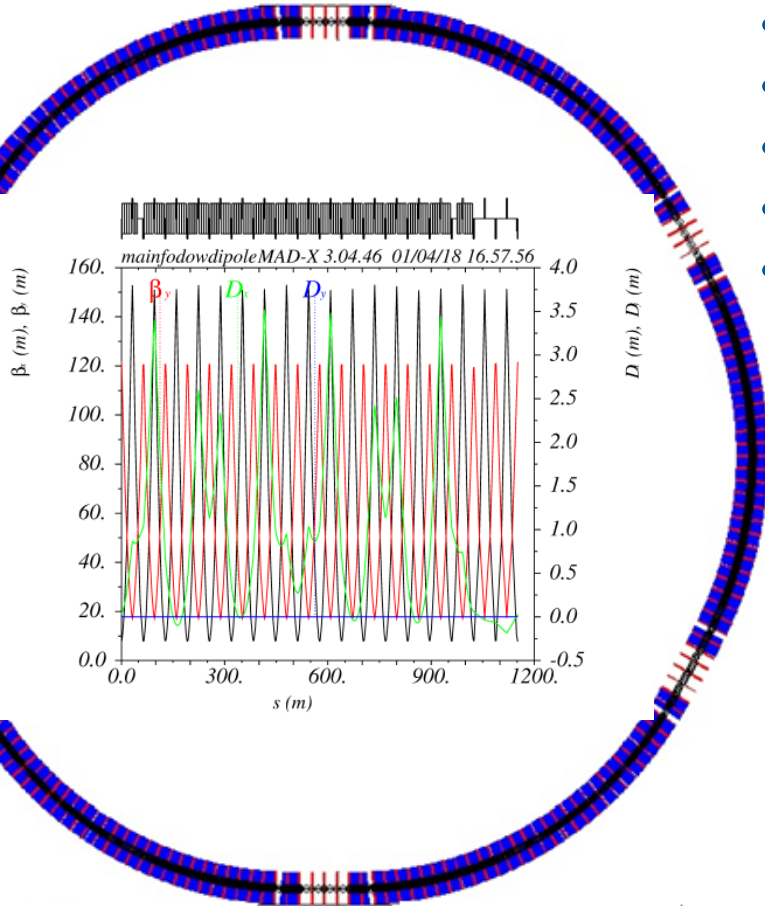


Böylece enerji kabulü, diğer tüm parametreler çoğunlukla başka nedenlerde belirlendiğinden, RF voltajı ile kontrol edilebilir.

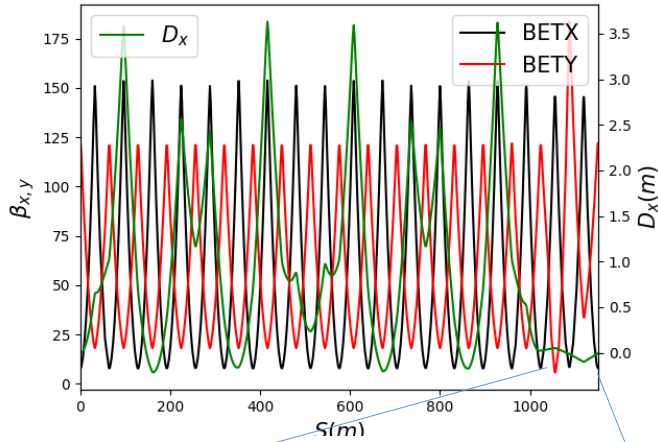
- Buradaki örnek hesaplamada (FCC-PBR), **1.0% enerji kabulü** sağlamak için **RF voltajı** girişte **15 MV** olmalı ve **45 MV** değerine kadar artırılmalıdır.

Mekanik kabul, hızlandırıcının vakum haznesi dediğimiz bölgenin belirlediği sınırdır. Bunu SPS hızlandırıcı için inceleyerek anlamaya çalışalım.

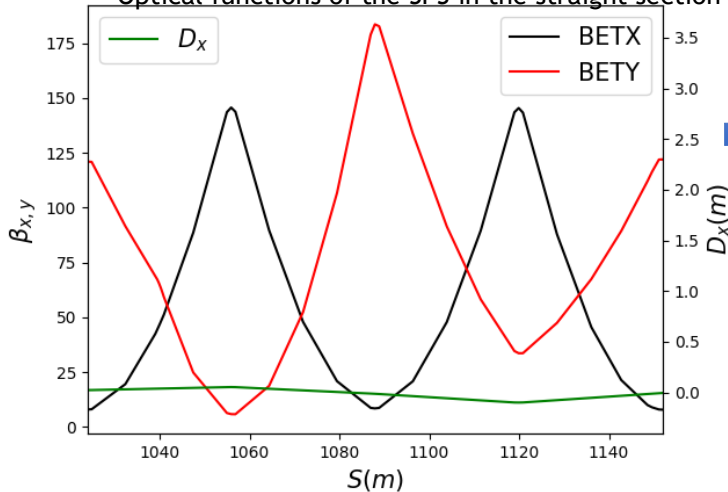
- SPS: **6 yay** (arc) ve **6 düz** bölgeden oluşur
- 6 özdeş periyod; her bir süper-periyod **18 FODO**
- Her bir süper-periyod **1.15 km**
- Hızlandırıcının çevresi **6.9 km**
- 744 bükücü magnet (her biri 6.26 m)



V. Kain, R. Alemany-Fernandez, H. Bartosik, S. Cettour Cave, K. Cornelis, P. Cruikshank, J. Ferreira Somoza, B. Goddard, C. Pasquino, CERN, Geneva, Switzerland, IPAC 18

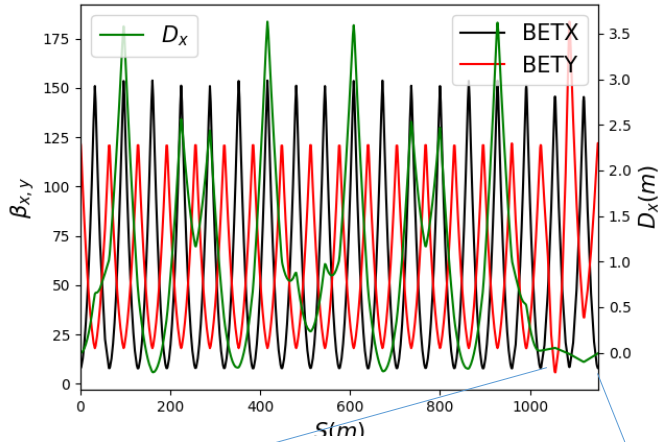


Optical functions of the SPS in the straight section

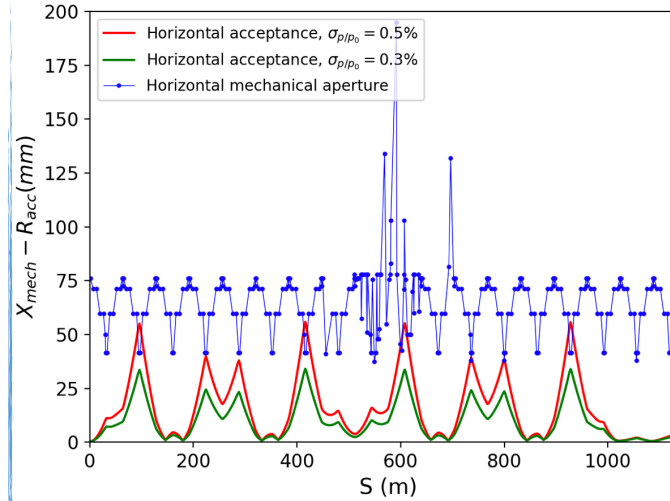
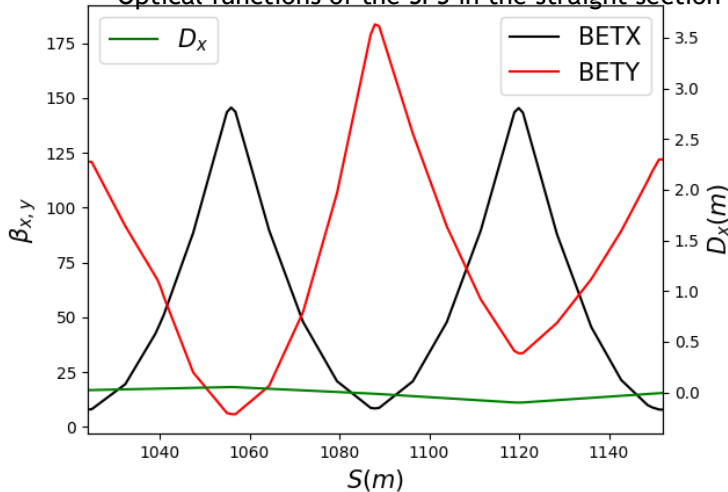


$$\epsilon_{max}(x/y) = \frac{(DA_{x/y} - D_{x,y}\delta - COD_{x,y})^2}{25 \times \beta_{x/y}}$$

Düz bilgenin giriş kısmında kabul edilebilir maksimum emittans 1580 ve 480 nm.rad (yatay ve düşey düzelemde). Ama, ...



Optical functions of the SPS in the straight section



$$R_{acc} = 5\sqrt{\beta_{x,y}\epsilon_{rms}} + 3D_{x,y}(\delta p/p_0)_{rms}$$

SPS için, bir Başka sınırlayıcı etki var:  
geometrik kabul.

# Enine Kabul

- **Lineer olmayan etkiler, sekstupol** magnetin kromatikliği düzeltmek için örgünün içerisine eklenmesiyle ve/veya magnet **hataların** eklenmesi ile demet dinamiği hesaplamalarına dahil edilmiş olur.
- Lineer olmayan etkiler altında x-y uzayında parçacığın **kararlı salınım** yapabildiği **maksimum büyüklük, dinamik aralık** olarak tanımlanır. Dinamik aralık, denge durumuna ulaşana kadar parçacığın hayatta kalabildiği demetin **enjeksiyon noktasındaki maksimum genişliği** olarak tanımlanabilir.
- Bu hesaplamalar için bir dizi optimizasyon adımları takip edilmiştir. **Çalışma noktası** (working point) seçimi iyi bir dinamik aralık elde edilmesinde çok önemlidir.

# Enine Kabul

- Bu hesaplamalar için bir dizi **optimizasyon** adımları takip edilir ve **analitik** olarak belirlenmesi **mümkün değildir**.
  - Betatron **ayar diyagramı** ve karşılık gelen **rezonans çizgileri**,
  - Çembersel hızlandırıcının **süper-periyodikliği**,
  - **Betatron ayarın tam sayı** kısmı,
  - **Rezonans sürücü terimler** (resonance driving terms, RDT),
  - **Enerji sapması** ve betatron **ayar kayması**,
  - **Ayar taraması** ve karşılık gelen dinamik aralık,
  - Daha gerçekçi sonuçlar için **alan ve hizalama hataları**,
  - **Frekans haritası analizi**

# Enine Kabul

**Rezonans şartı** şu şekildedir:

$$(j - k) \times Q_x + (l - m) \times Q_y = P \times n$$

- Burada **j, k, l, m, n** tam sayılardır. Bu rezonans çizgileri, ayar diyagramı olarak bilinen **Q<sub>x</sub>, Q<sub>y</sub>** düzlemlerinde gösterilir. Farklı rezonans çizgilerinin dinamik aralık üzerinde farklı etkileri vardır ve bu etkiler genelde yüksek derecelerde (order) azalma eğilimindedir.
- Böylece, rezonans çizgisine olan mesafe konusunda daha esnek olunabilir. Yüksek derecelerde, çalışma noktası bu rezonans çizgilerine çok yakın olduğu durumda bir etkisi olabilir. Burada bahsi geçen çalışma noktası, dipol ve kuadrupol magnetlerdeki hataların kapalı yörünge üzerinde büyük etkilere sebep olabileceğinden **tam ve tam sayının yarısına** karşılık gelen rezonans çizgilerinden uzak seçilir.
- Buna ek olarak, kromatikliğin kontrol edilmesi için gerekli olan sekstupol magnetler ile birlikte **üçüncü dereceli rezonans çizgileri** de önemli hale gelmiş olur. Özellikle, güçlü sekstupol magnet kullanılan tasarımlarda, yüksek dereceli rezonans çizgileri de dikkate alınmalıdır



Rezonans şartı şu şekildedir:

$$(j - k) \times Q_x + (l - m) \times Q_y = P \times n$$

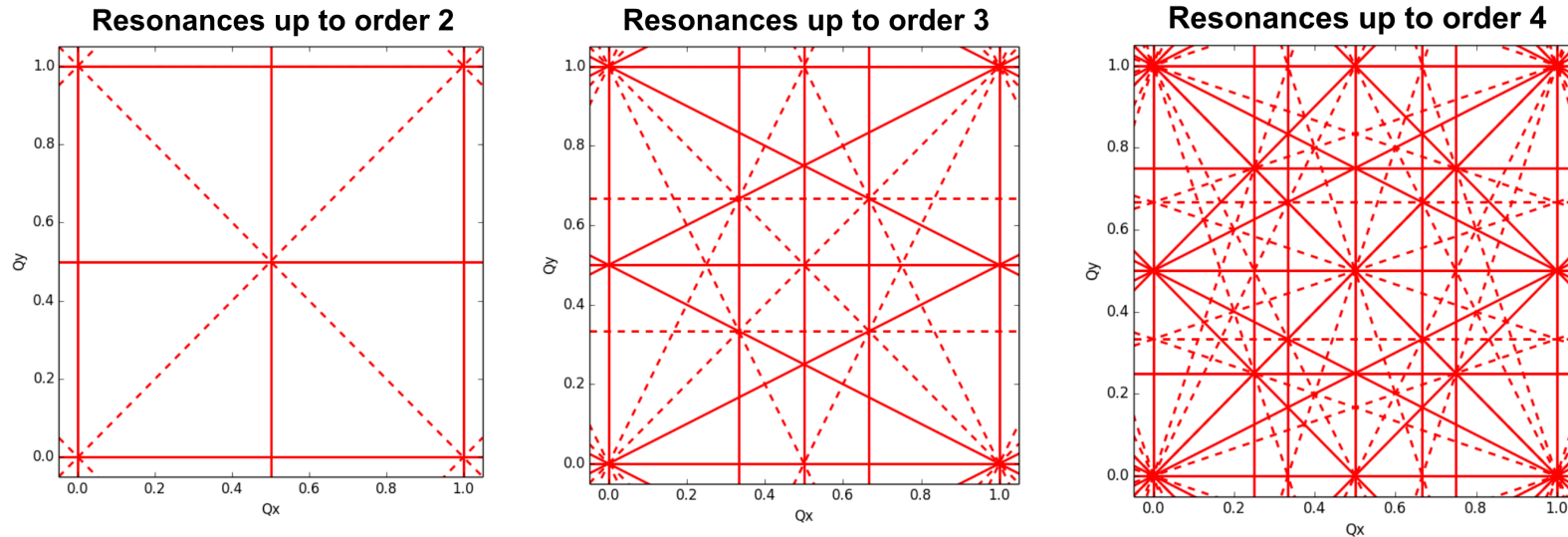


Fig: H. Bartosik, 2019 JUAS lecture

Rezonans şartı şu şekildedir:

$$(j - k) \times Q_x + (l - m) \times Q_y = P \times n$$

Bir çembersel hızlandırıcının **süper-periyodikliği** bazı rezonans çizgilerinin bastırılmasına yardım edebilir: Bastırılmış rezonans çizgileri **systematik olmayan** rezonans çizgisi, diğerleri ise **systematik** rezonans çizgileri olarak isimlendirilir.

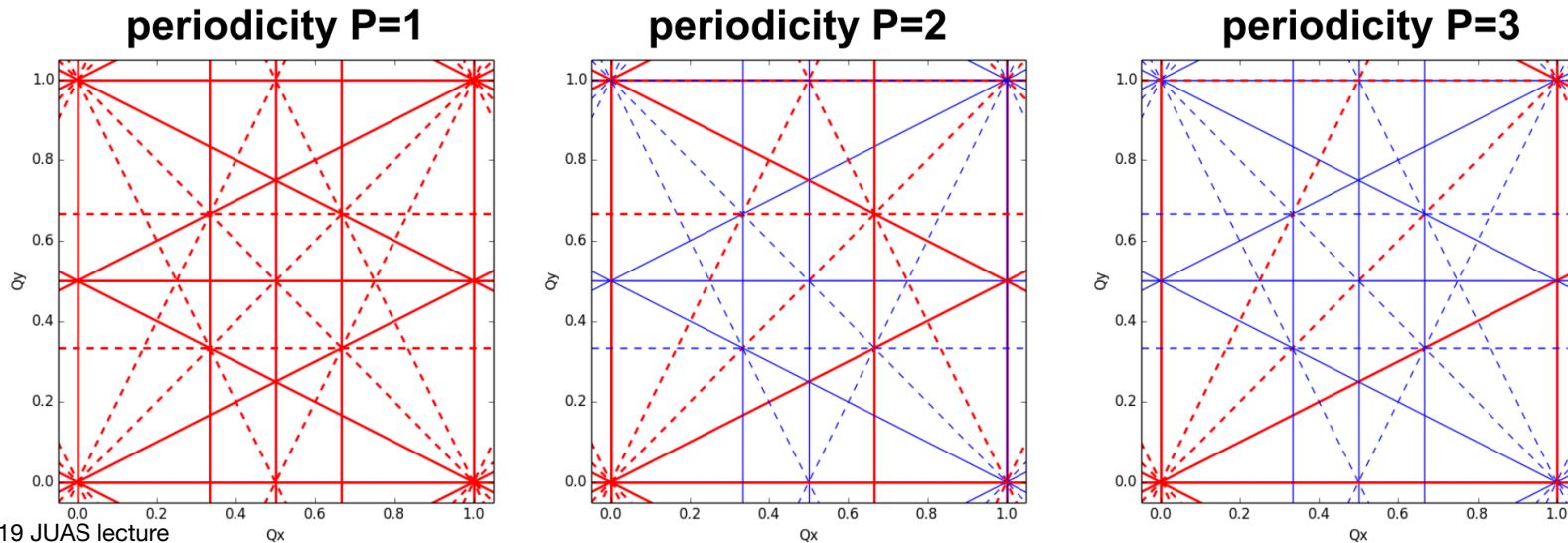
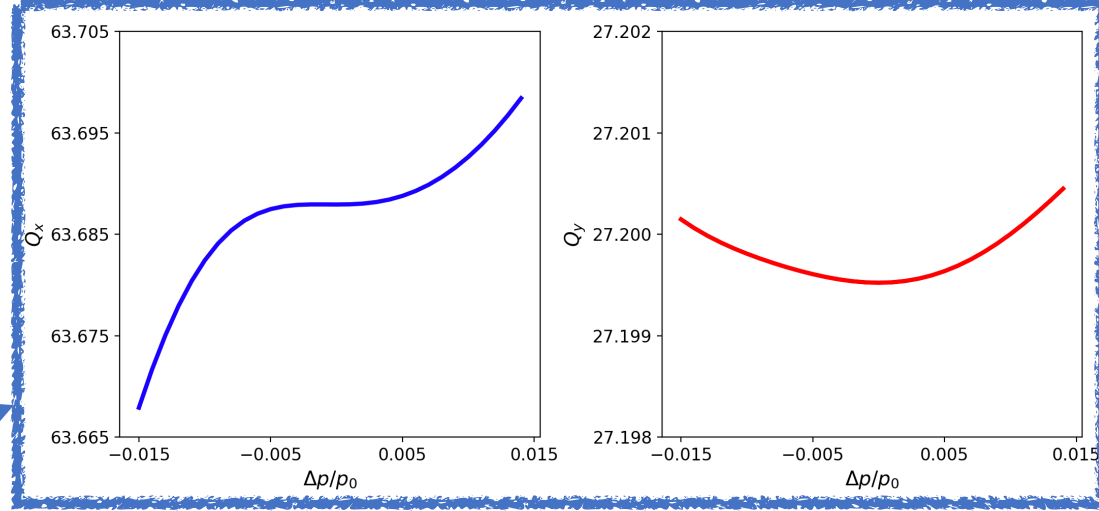
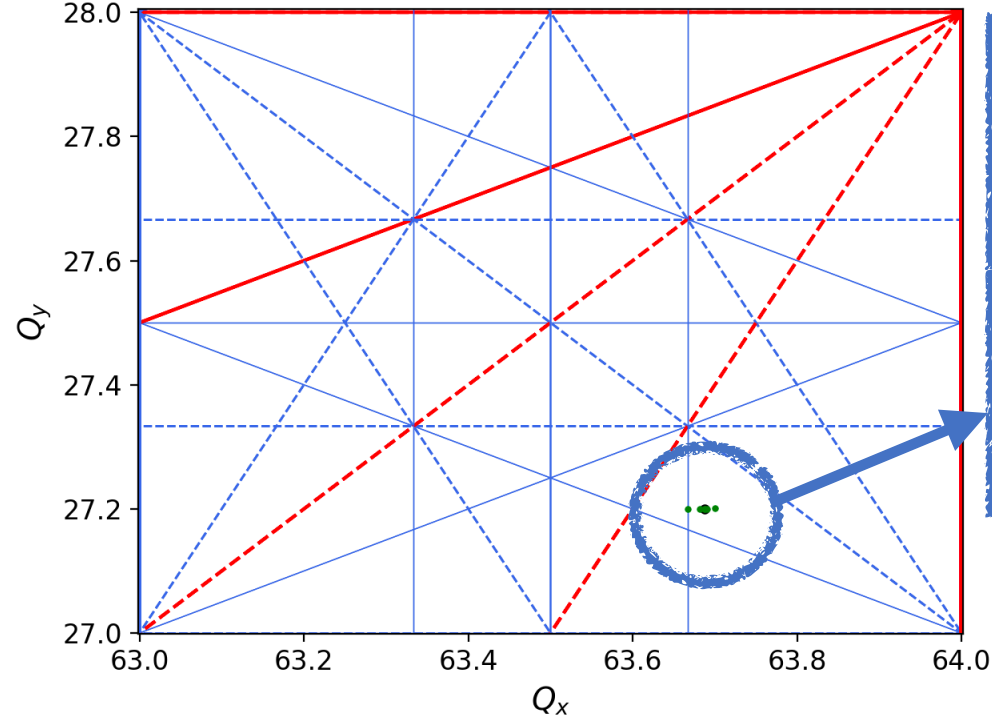


Fig: H. Bartosik, 2019 JUAS lecture

# Enine Kabul

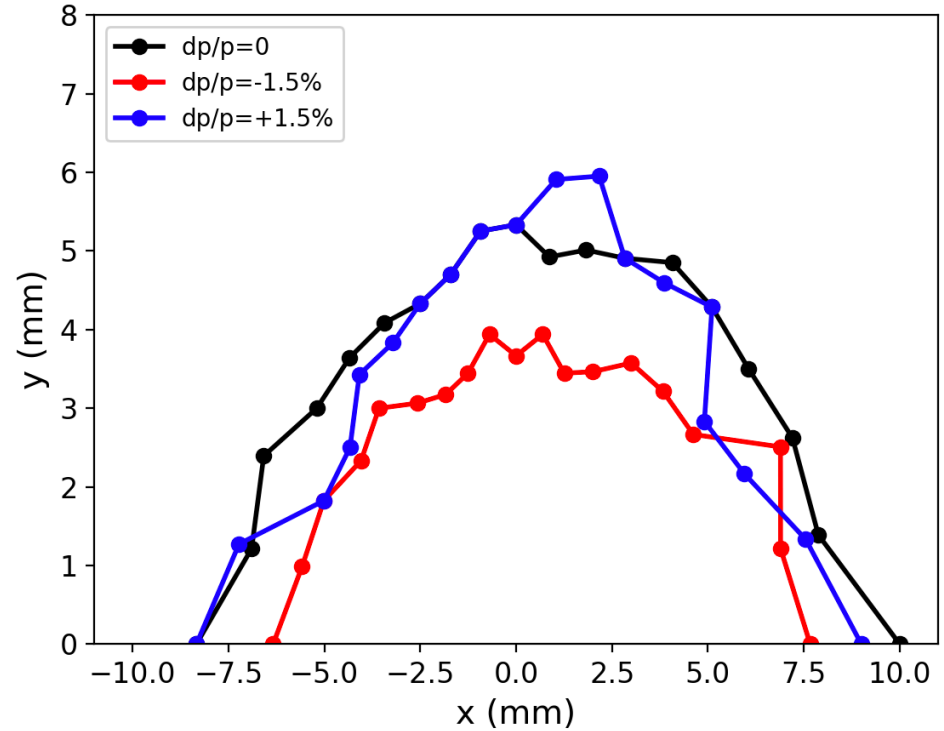
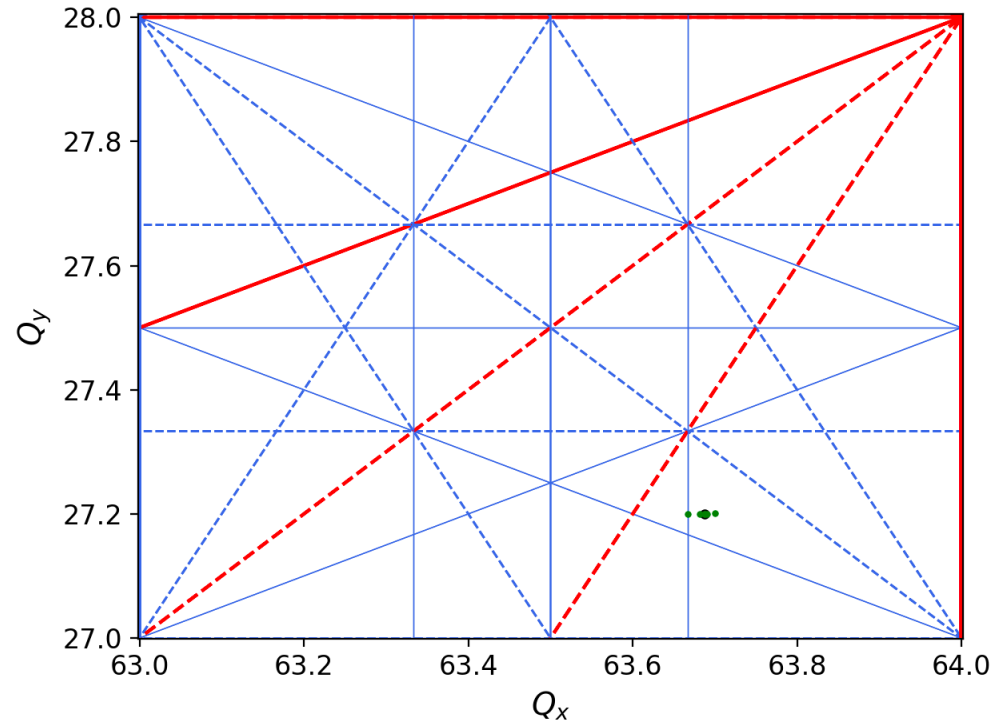
- İdeal momentumda olmayan parçacıklar için, farklı enerji sapmalarına karşılık gelen betatron ayar kayması durumuna bakmak önemlidir.



- Bu kayma enerji sapması ile birlikte çok büyük olması durumunda, rezonans çizgileri nedeniyle dinamik aralığı ideal momentumda olmayan parçacıklar için çok daraltabilir. Bu durumda, lineer olmayan kromatikliği düzeltmek için ek sekstupol magnet aileleri veya oktopol magnetler kullanmak gerekebilir.

# Enine Kabul

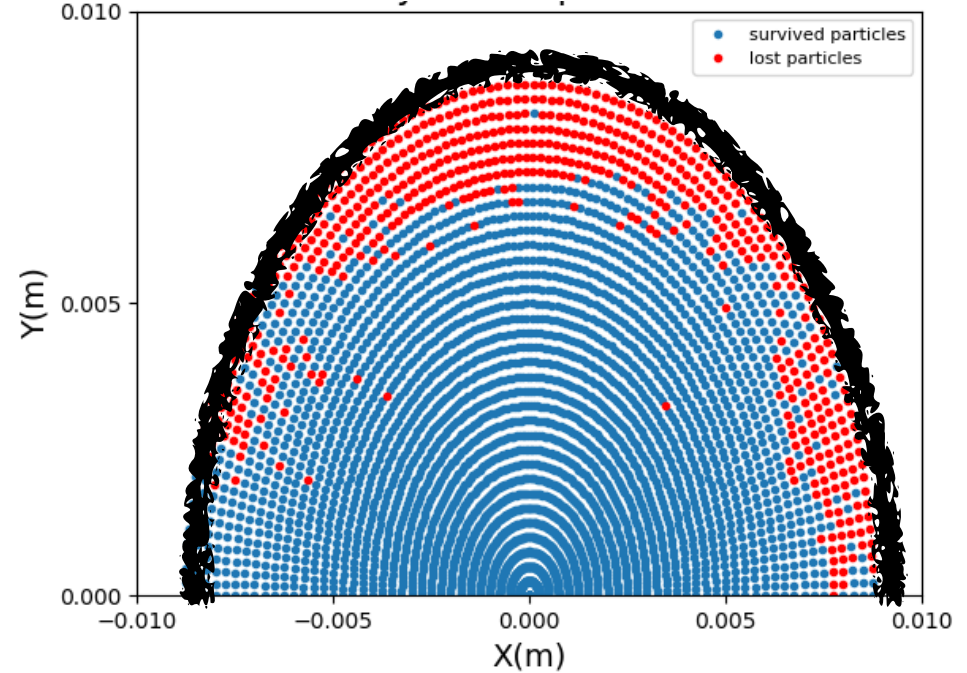
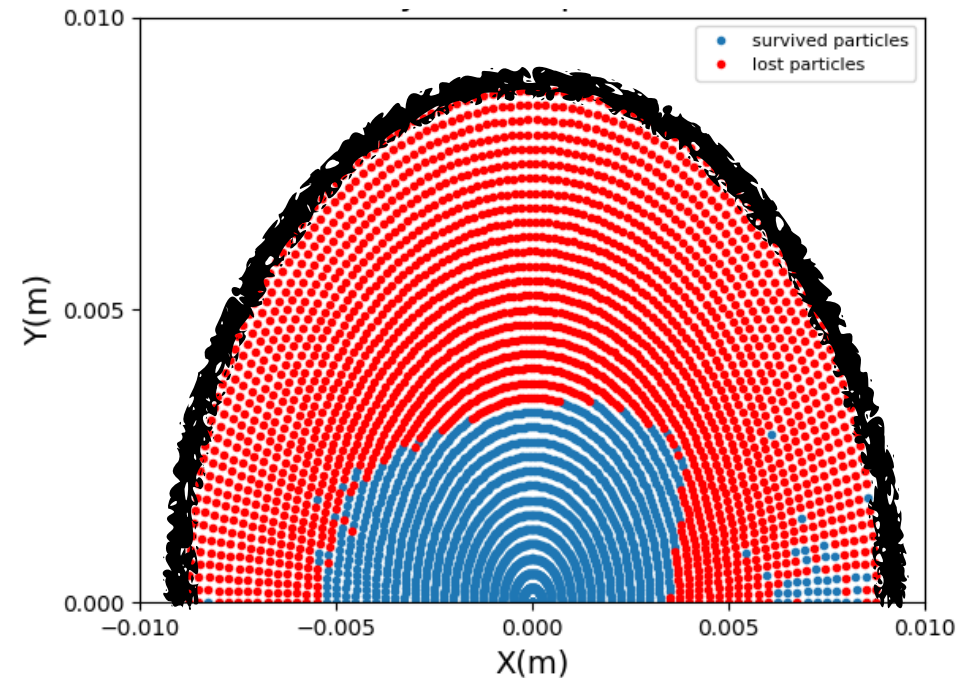
- İdeal momentumda olmayan parçacıklar için, farklı enerji sapmalarına karşılık gelen betatron ayar kayması durumuna bakmak önemlidir.



- Bu kayma enerji sapması ile birlikte çok büyük olması durumunda, rezonans çizgileri nedeniyle dinamik aralığı ideal momentumda olmayan parçacıklar için çok daraltabilir. Bu durumda, lineer olmayan kromatikliği düzeltmek için ek sekstupol magnet aileleri veya oktopol magnetler kullanmak gerekebilir.

# Enine Kabul

Lineer olmayan etkiler, **sestupol** magnetin kromatikliği düzeltmek için örgünün içerisine eklenmesiyle ve/veya **magnet hataların** eklenmesi ile demet dinamiği hesaplamalarına dahil edilmiş olur. Lineer olmayan etkiler altında **x-y uzayında** parçacığın **kararlı salınım yapabildiği maksimum büyüklük, dinamik aralık** olarak tanımlanır. Dinamik aralık, denge durumuna ulaşana kadar parçacığın hayatta kalabildiği demetin enjeksiyon noktasındaki maksimum genişliği olarak tanımlanabilir





- Neden küçük emittans değerine ulaşmak istenir?

$$B = \frac{N_{ph}}{4\pi^2 \sigma_x \sigma_x^i \sigma_y \sigma_y^i \frac{dw}{w}}$$

$$\mathcal{L} = \frac{N_1 N_2 f n_b}{4\pi \sigma_x \sigma_y} \cdot W \cdot e \frac{B^2}{A} \cdot S$$

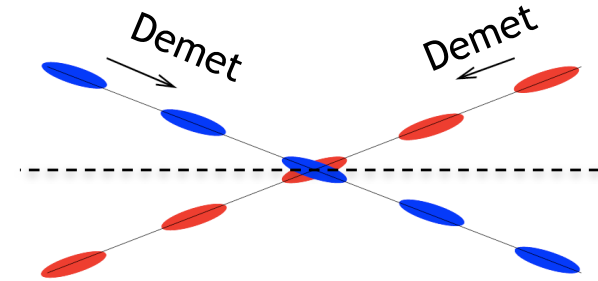
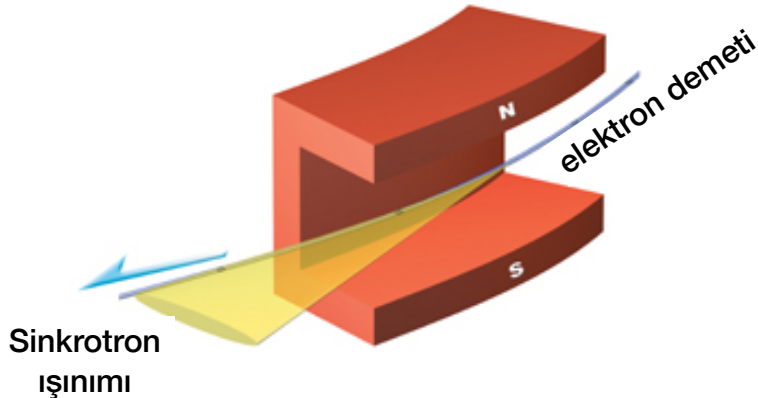
Paketçik yopunluğu

Paketçik sayısı

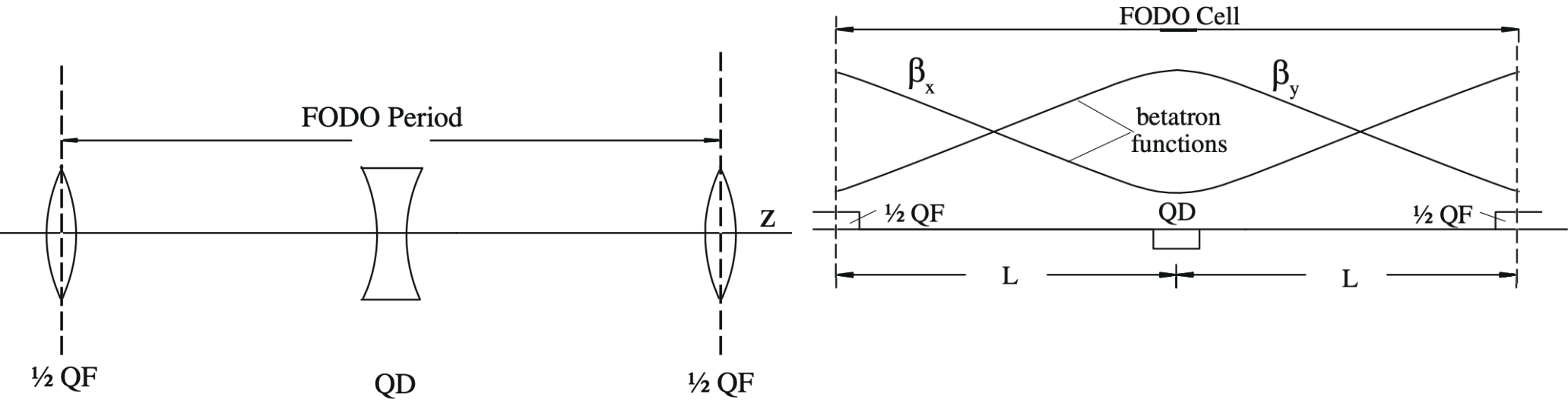
Sabit

Demet boyutu

$$\sigma_{x,y} = \sqrt{\epsilon \cdot \beta_{x,y}^*}$$



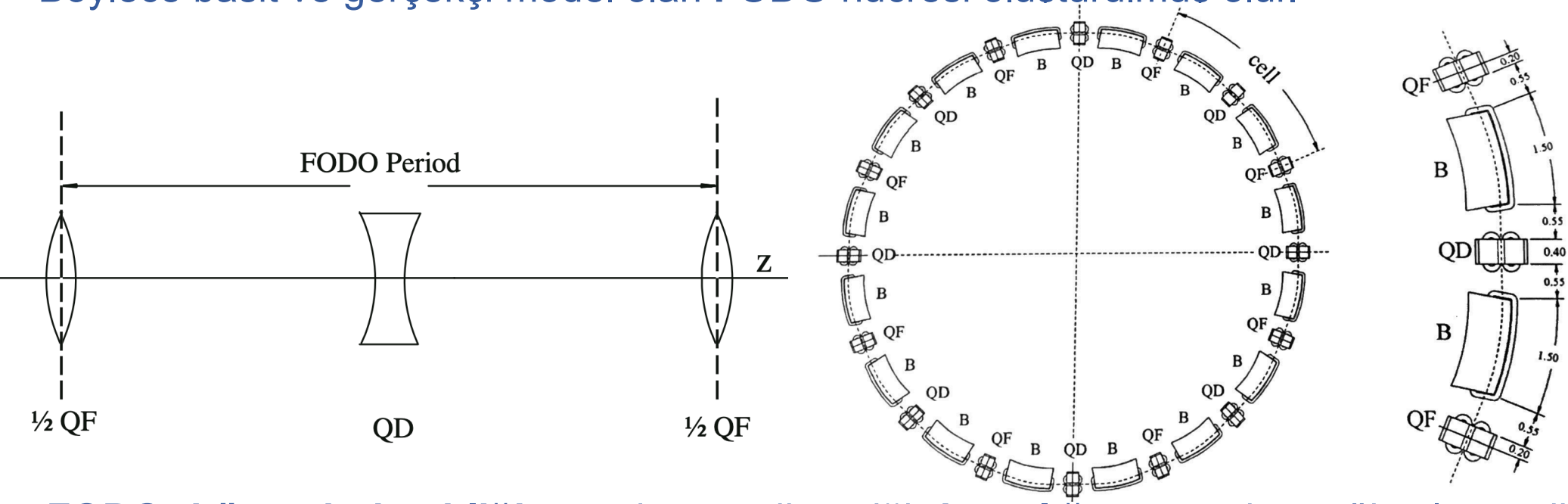
- En basit periyodik (ve en kullanışlı) örgü, eşit aralıklarla eşit güçlü odaklayıcı magnetlerin (yatay ve düşey) dizilmesinden oluşur.
- Böylece basit ve gerçekçi model olan **FODO** hücresi oluşturulmuş olur.



- FODO** hücresi, basitliği ve demet dinamiği kararlılığı açısından yüksek enerji tesislerinde en yaygın olarak kullanılan örgü türüdür.



- En basit periyodik (ve en kullanışlı) örgü, eşit aralıklarla eşit güçlü odaklayıcı magnetlerin (yatay ve düşey) dizilmesinden oluşur.
- Böylece basit ve gerçekçi model olan **FODO** hücresi oluşturulmuş olur.



- **FODO** hücresi, basitliği ve demet dinamiği **kararlılığı** açısından yüksel enerji tesislerinde en yaygın olarak kullanılan örgü türüdür.

Çembersel hızlandırıcıda **emittansı** (yatay) **düşürmek** için birkaç yöntem düşünülebilir:

- Hızlandırıcı içerisindeki **dipol magnet sayısını** artırmak: Böylece bir dipol magnetin bükme açısı azaltılmış olur
- Sinkrotron ışınımın integralleri içerisindeki **H fonksiyonunu** azaltmak: **Faz ilerlemelerine** karşılık gelen H değerleri farklıdır.

$$\epsilon_0 = c_q \gamma^2 \frac{I_5}{J_x I_2}$$

$$I_2 = \oint \frac{1}{\rho^2} ds$$

$$I_5 = \oint \frac{\mathcal{H}_x}{\rho^3} ds$$

$$\mathcal{H}_x = \gamma_x \eta_x^2 + 2\alpha_x \eta_x \eta_{px} + \beta_x \eta_{px}^2$$

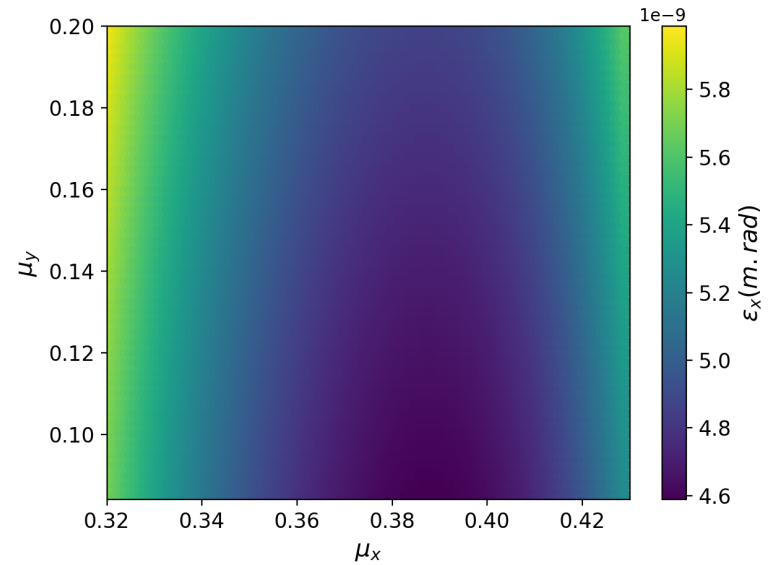
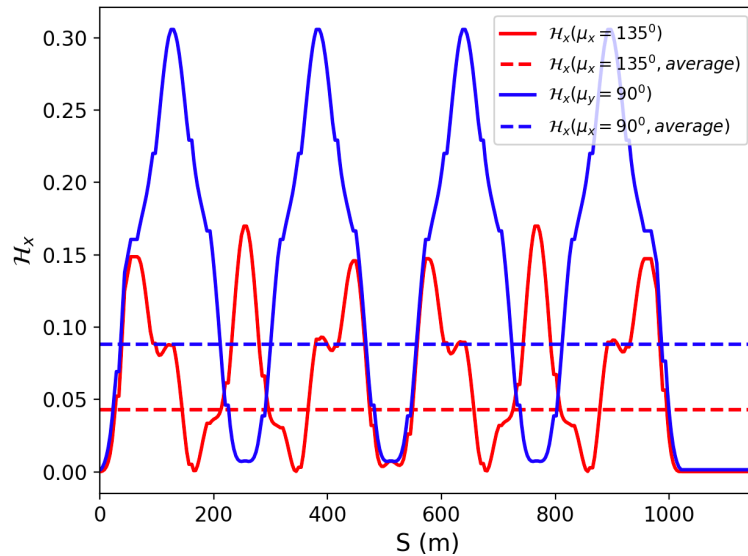
- Sinkrotron ışınımın integralleri içerisindeki H fonksiyonunu azaltmak: Faz ilerlemelerin karşılık gelen H değerleri farklıdır.

$$\epsilon_0 = c_q \gamma^2 \frac{I_5}{J_x I_2}$$

$$I_2 = \oint \frac{1}{\rho^2} ds$$

$$I_5 = \oint \frac{\mathcal{H}_x}{\rho^3} ds$$

$$\mathcal{H}_x = \gamma_x^2 n_x^2 + 2\alpha_x n_x n_{px} + \beta_x n_{px}^2$$



Çembersel hızlandırıcıda **emittansı** (yatay) **düşürmek** için birkaç yöntem düşünülebilir:

- Hızlandırıcı içerisindeki **dipol magnet sayısını** artırmak: Böylece bir dipol magnetin bükme açısı azaltılmış olur
- Sinkrotron ışınımın integralleri içerisindeki **H fonksiyonunu** azaltmak: **Faz ilerlemelerine** karşılık gelen H değerleri farklıdır.

$$\epsilon_0 = c_q \gamma^2 \frac{I_5}{J_x I_2}$$

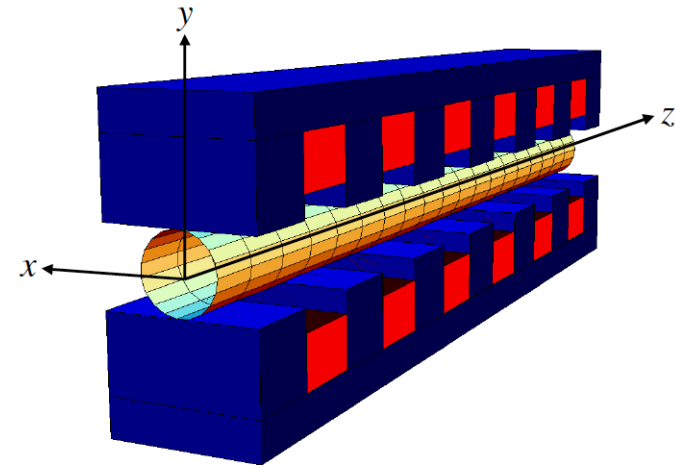
$$I_2 = \oint \frac{1}{\rho^2} ds$$

$$I_5 = \oint \frac{\mathcal{H}_x}{\rho^3} ds$$

$$\mathcal{H}_x = \gamma_x \eta_x^2 + 2\alpha_x \eta_x \eta_{px} + \beta_x \eta_{px}^2$$

- Sinkrotron ışınımını artırmak için **sönüm magneti** yerleştirilebilir (sinkrotron ışınım integralleri değiştirilmiş olur).
- Sönüm paylaşım sayısını değiştirmek için ( $J_{x,y,z}$ ) **Robinson sönüm magneti** eklenebilir.
- Örgü yapısını değiştirmek

- Daha evvel yüklü parçacığın çembersel hızlandırıcı içerisinde sinkrotron ışınımı yaptığını ve bunun da betatron salınımında, emittans değerinde, azalmaya neden olduğu belirtilmişti. Burada bahsi geçen **sönüm magneti** (damping wigglers), temelde kısa **dipol magnetlerin** ardı ardına farklı yönlerde **dizilmesiyle** elde edilen özel bir magnettir
- Bu magnetler, sinkrotron ışınımını sönümünü güçlendirerek tur başına enerji kaybı ( $U_o$ ), enerji yayılımı ( $\sigma_s$ ), emittans ( $\epsilon_x$ ), sönüm zamanı ( $\tau_x$ ) gibi parametreleri **etkiler**.



$$\tau_x = \frac{3E_0}{2\pi r_0 c^2} \frac{C}{\beta\gamma^2(J_x + F_w)} \quad ; \quad F_w = \frac{L_w B_w^2}{4\pi B^2 \rho}$$

$$\sigma_s = \gamma \left( \frac{Bc_q(1 + F_w \frac{B_w}{B})}{B\rho(3 - J_x + 2F_w)} \right)^{1/2}$$

$$\epsilon_x = \frac{c_q \gamma^2}{12(1 + F_w)J_x} \left( \frac{e_r \theta^3}{\sqrt{15}} + \frac{\beta_{xw} F_w \beta_w^2 \gamma^3}{16(B\rho)^3} \right)$$

$$U_o = 2\pi c_q \frac{E^4}{Nl} (1 + F_w)$$

Fig: Y. Papaphilippou, 2016 LC school lecture

- **Robinson sönüm magneti** (Robinson wiggler magnet), normal sönüm magnetinden biraz farklı olarak, bükücü-odaklayıcı magnetlerin (combined function magnet) ardı ardına dizilmesi ile oluşturulan özel bir magnettir.
- Bu magnetler dördüncü sinkrotron integralini ( $I_4$ ) modifiye ederek  $D$  ( $I_4/I_2$ ) parametresini (sönüm paylaşım numarası, damping partition number) değiştirir.

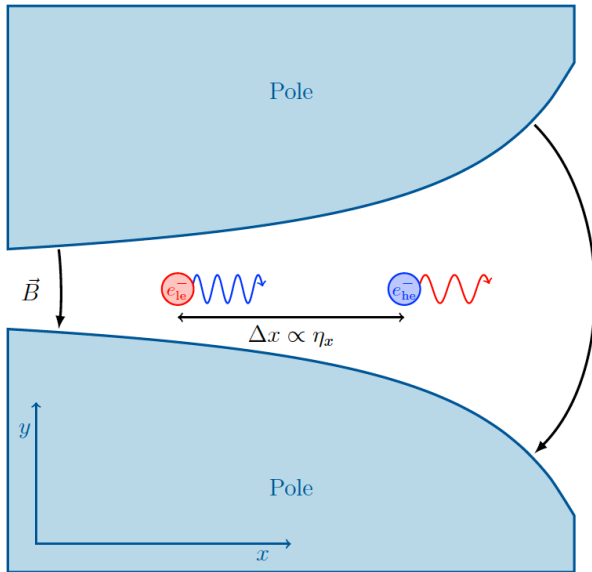


Fig: Tobias Tydecks, PhD thesis, 2016

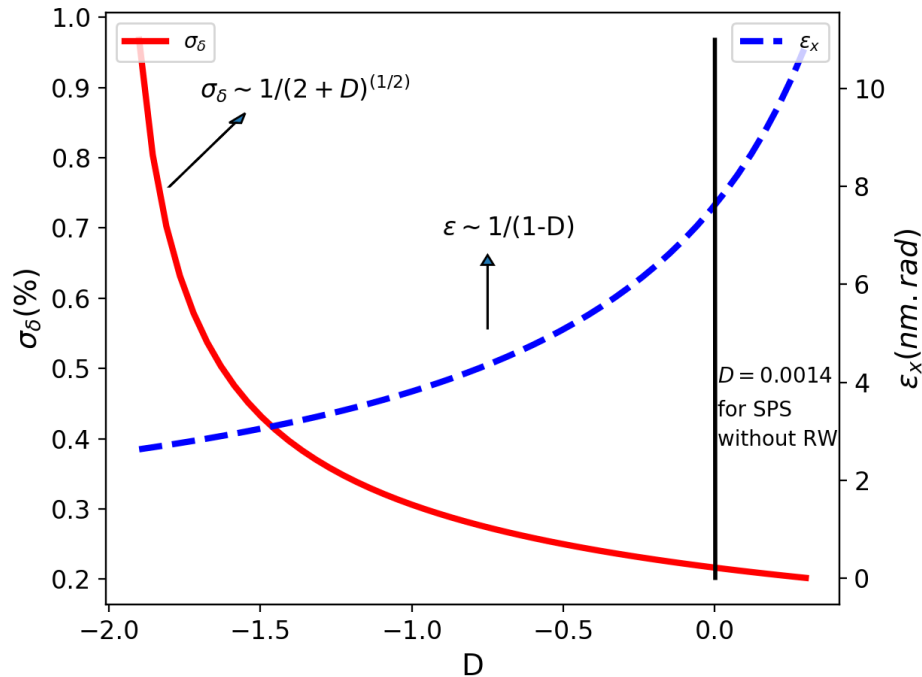
Equilibrium horizontal emittance  $\epsilon_0 = c_q \gamma^2 \frac{I_5}{J_x I_2}$   $\approx 1/(1-D)$

Equilibrium energy spread  $\sigma_\delta^2 = c_q \gamma^2 \frac{I_3}{J_z I_2}$   $\approx 1/(2+D)^{1/2}$

Damping time  $J_x \tau_x = J_y \tau_y = J_z \tau_z = 2 \frac{E_0}{U_0} T_0$   $\approx 1/(1-D)$

Energy loss per turn  $U_0 = \frac{c_\gamma}{2\pi} E^4 I_2$   $\approx I_2$

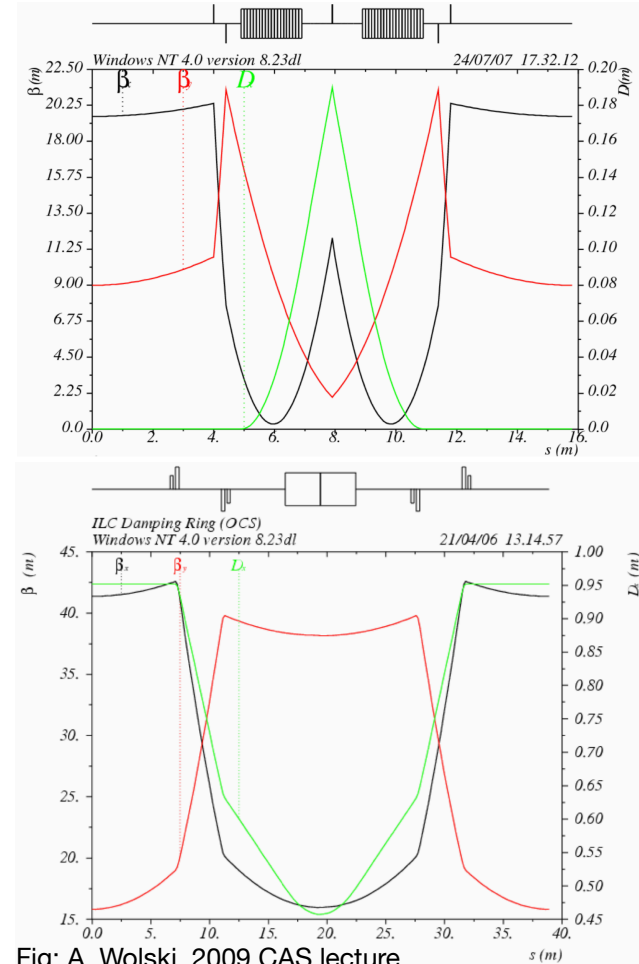
- **Robinson sönüm magneti** (Robinson wiggler magnet), normal sönüm magnetinden biraz farklı olarak, bükücü-odaklayıcı magnetlerin (combined function magnet) ardı ardına dizilmesi ile oluşturulan özel bir magnettir.
- Bu magnetler dördüncü sinkrotron integralini ( $I_4$ ) modifiye ederek  $D$  ( $I_4/I_2$ ) parametresini (sönüm paylaşım numarası, damping partition number) değiştirir.



- Robinson sönüm magnetinin örgü içerisine eklenmesiyle **enine emittans** önemli ölçüde azaltılabilirken, aksi şekilde **enerji yayılımı** artış gösterir.



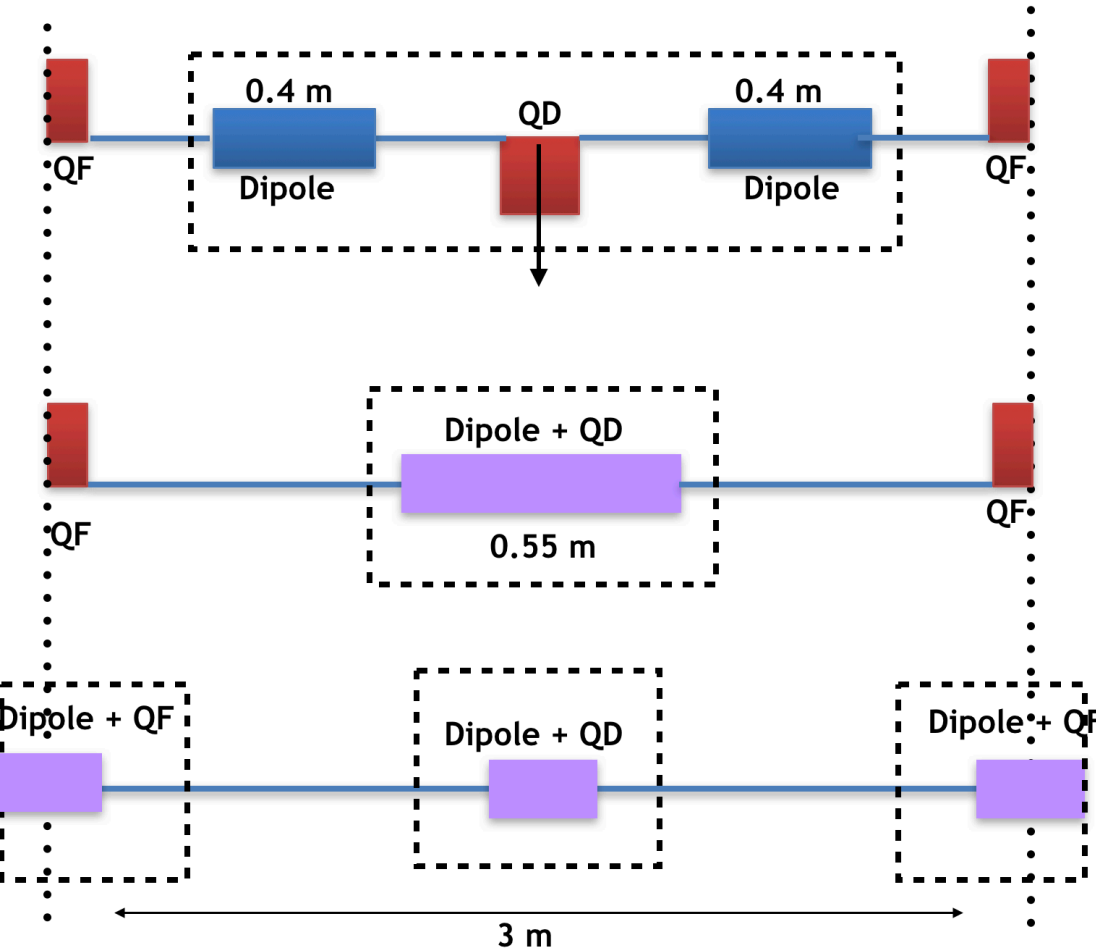
- **Örgü yapısını değiştirmek:** buradaki temel amaç dispersiyon fonksiyonunu daha düşük değerlere çekerek emittansı düşürmek.



Lattice Style	Minimum Emittance	Conditions
90 FODO	$\varepsilon_0 \approx 2\sqrt{2}C_q\gamma^2\theta^3$	$\frac{f}{L} = \frac{1}{\sqrt{2}}$
Minimum emittance FODO	$\varepsilon_0 \approx 1.2C_q\gamma^2\theta^3$	$\mu \approx 137^\circ$
DBA	$\varepsilon_0 \approx \frac{1}{4\sqrt{15}}C_q\gamma^2\theta^3$	$\eta_0 = \eta_{p0} = 0$ $\beta_0 \approx \sqrt{12/5}L$ $\alpha_0 \approx \sqrt{15}$
TME	$\varepsilon_0 \approx \frac{1}{12\sqrt{15}}C_q\gamma^2\theta^3$	$\eta_{\min} \approx \frac{L\theta}{24}$ $\beta_{\min} \approx \frac{L}{2\sqrt{15}}$

Fig: A. Wolski, 2009 CAS lecture

## • Combined-function magnet and reversed-bend magnet (örnek bazı hesaplar):

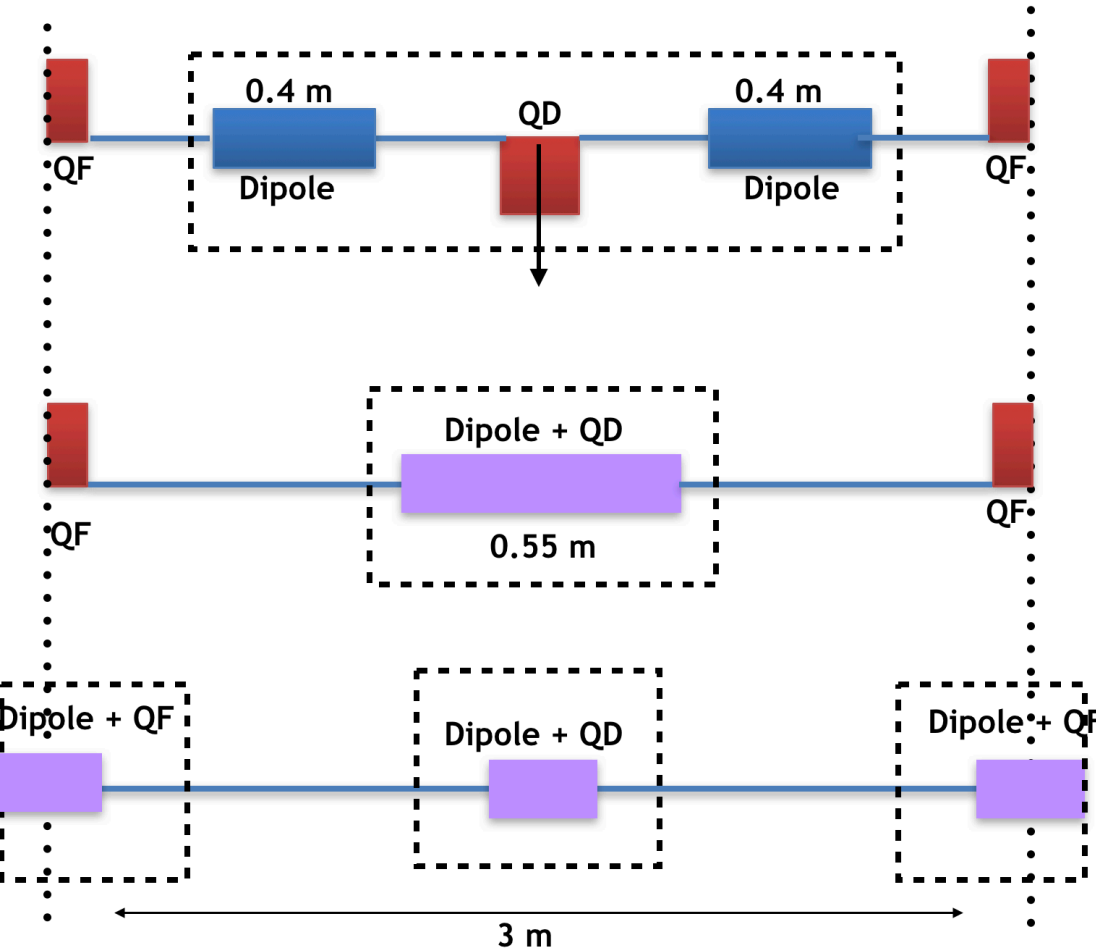


Parameters	FCC-DR
Energy [GeV]	1.54 GeV
Bending angle [degree]	4.5
Emittance [nm.rad]	6
Damping time [ms]	12.8
Energy loss per turn [keV]	2.4
Energy spread [%]	0.05
Damping partition (D)	0.02
Jx/Jy/Jz	0.98/1/2.02

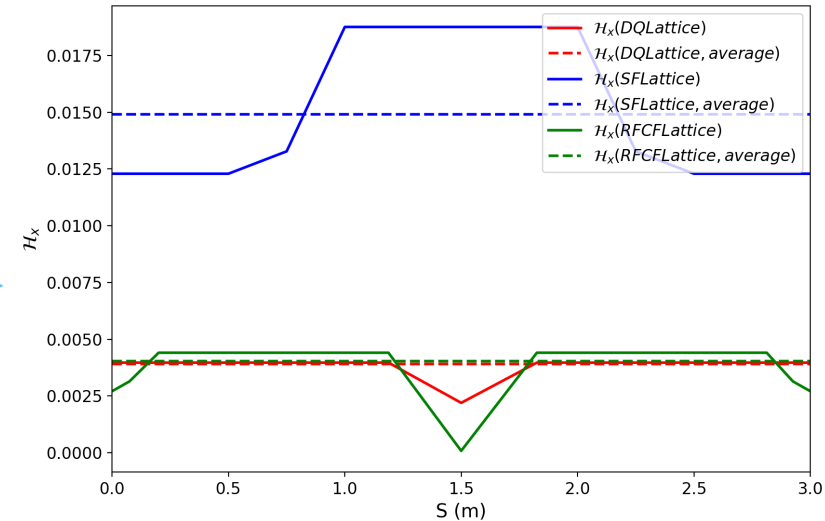
Parameters	FCC-DR
Energy [GeV]	1.54 GeV
Bending angle [degree]	9
Emittance [nm.rad]	1.3
Damping time [ms]	5.6
Energy loss per turn [keV]	3.5
Energy spread [%]	0.08
Damping partition (D)	-0.53
Jx/Jy/Jz	1.53/1/1.47

Parameters	FCC-DR
Energy [GeV]	1.54 GeV
Bending angle [degree]	10.8/-0.9
Emittance [nm.rad]	1.13
Damping time [ms]	3.6
Energy loss per turn [keV]	5.3
Energy spread [%]	0.09
Damping partition (D)	-0.56
Jx/Jy/Jz	1.56/1/1.44

## • Combined-function magnet and reversed-bend magnet (örnek bazı hesaplar):

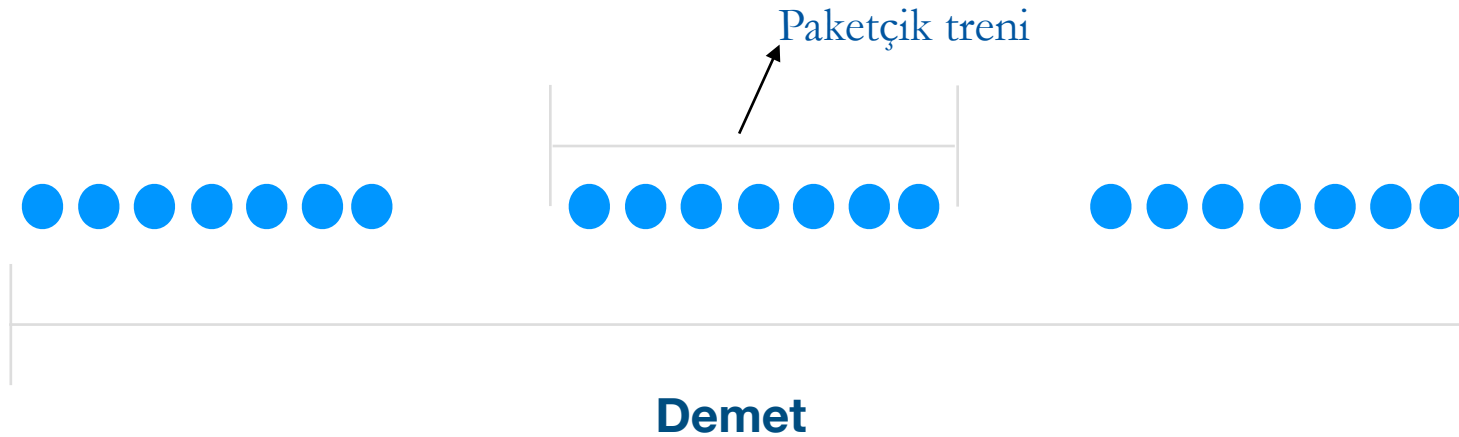


Parameters	FCC-DR
Energy [GeV]	1.54 GeV
Bending angle [degree]	4.5
Emittance [nm.rad]	6
Damping time [ms]	12.8
Energy loss per turn [keV]	2.4



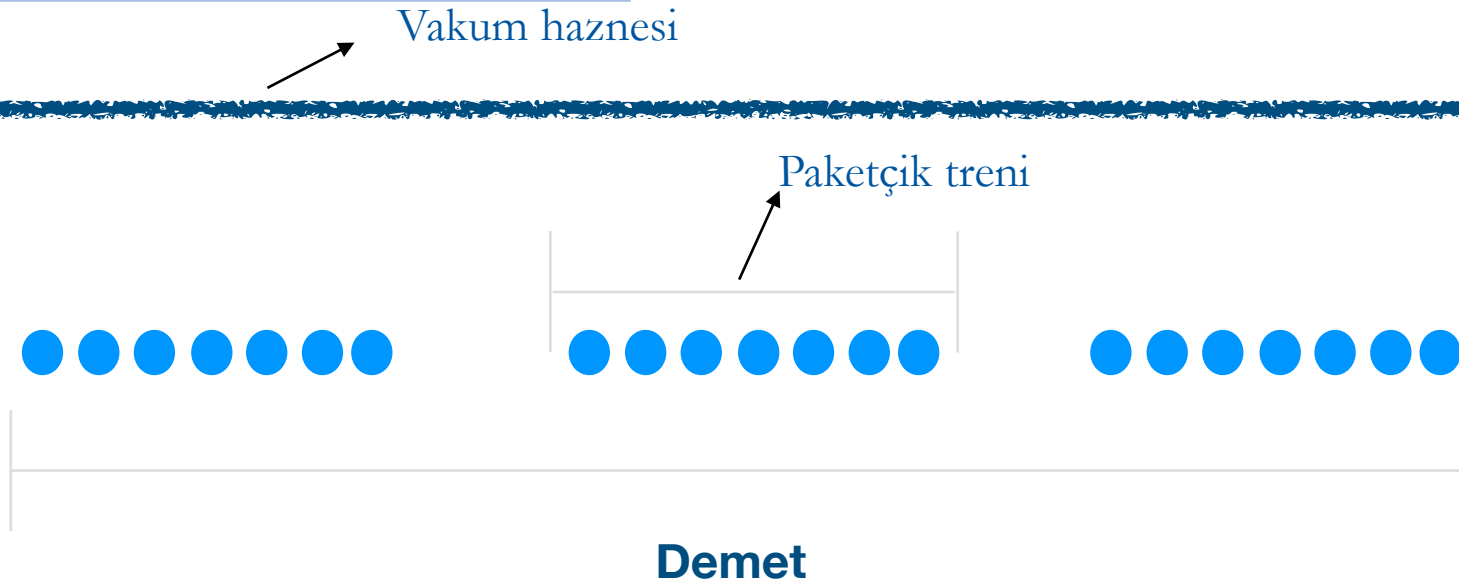
Bending angle [degree]	10.8/-0.9
Emittance [nm.rad]	1.13
Damping time [ms]	3.6
Energy loss per turn [keV]	5.3
Energy spread [%]	0.09
Damping partition (D)	-0.56
Jx/Jy/Jz	1.56/1/1.44

## ○ Kolektif etki nedir?



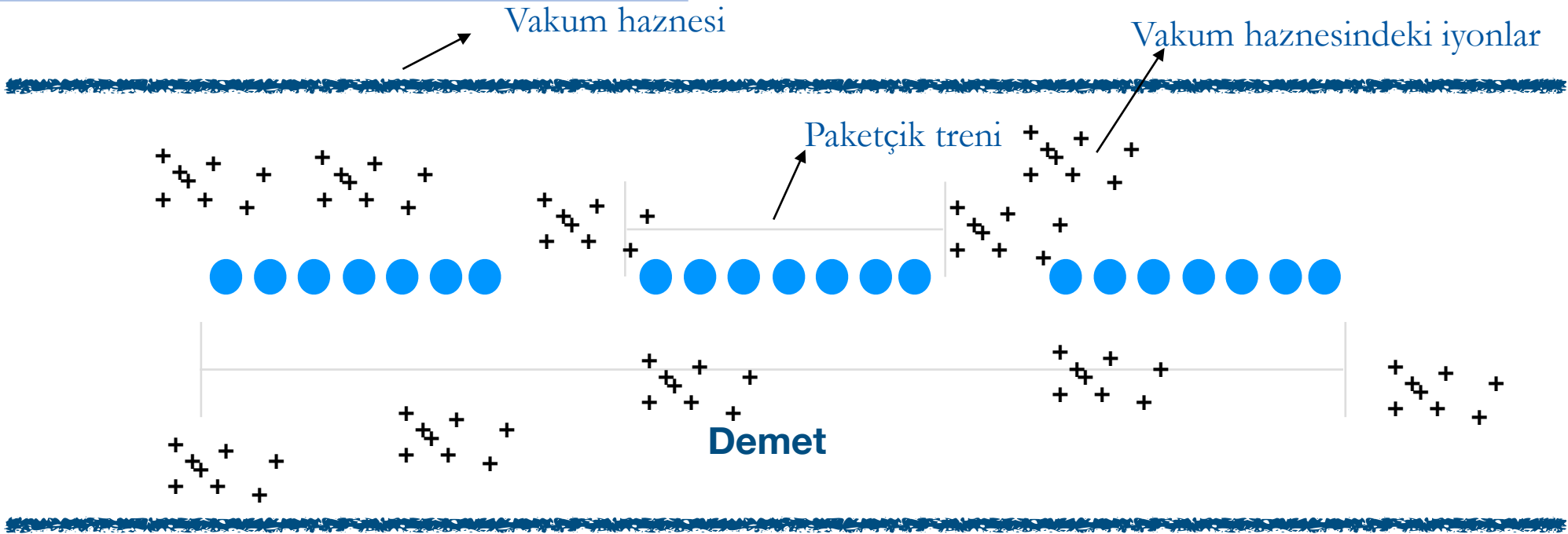
Bir çok (veya bir) paketçik treni hızlandırıcı içerisinde hareket eder. Buna demet (beam) denir. Böylece parçacıklar, paketçikler, paketçik trenleri (yüklerinden dolayı) birbirlerini etkileyebilir.

## ○ Kolektif etki nedir?



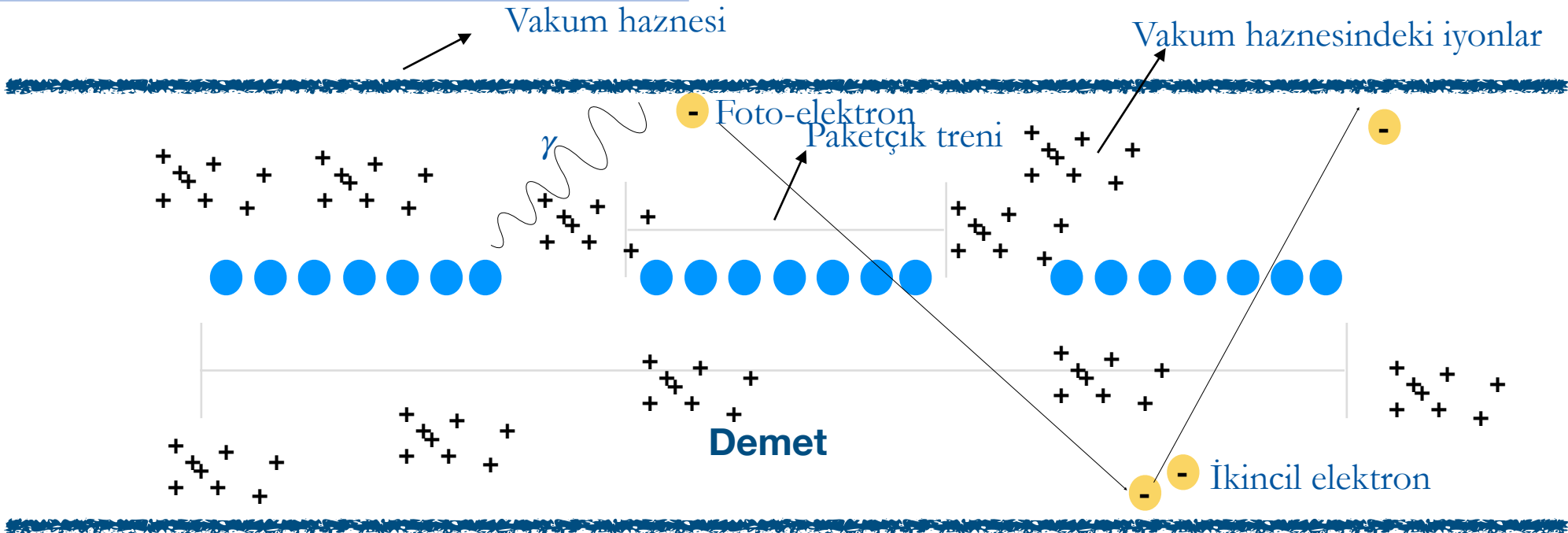
Parçacık demeti vakum haznesi içerisinde hareket eder.  
Böylece, vakum haznesi de demeti etkileyebilir.

## ○ Kolektif etki nedir?



Bu hazne içerisinde mutlak bir vakum olamayacağından, içeride iyonlar kalır. Böylece, bu iyonlar demeti etkileyebilir.

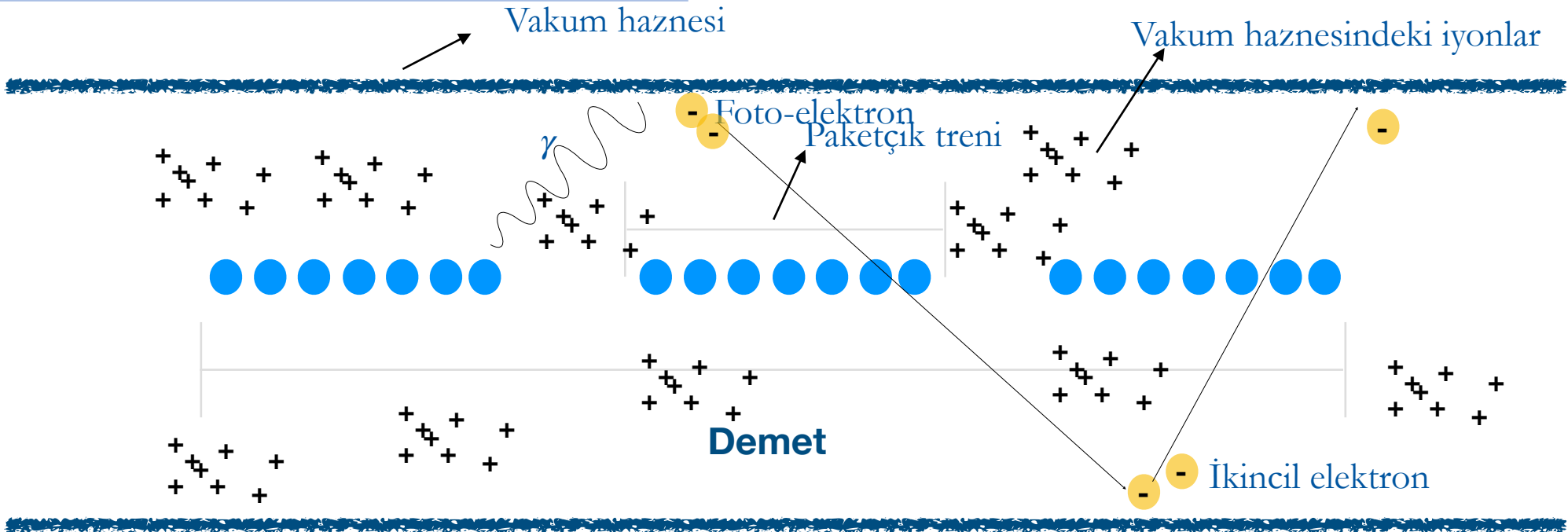
## ○ Kolektif etki nedir?



Fotonlar (vakum haznesinde hareket eden parçacıklardan yayılmış) veya iyonlaşmış gazlar elektron oluşturabilir; bu birincil elektronlar ikincil elektronlar oluşturabilir. Böylece, bu elektron bulutu (elektron cloud) demeti etkileyebilir.



## ○ Kolektif etki nedir?



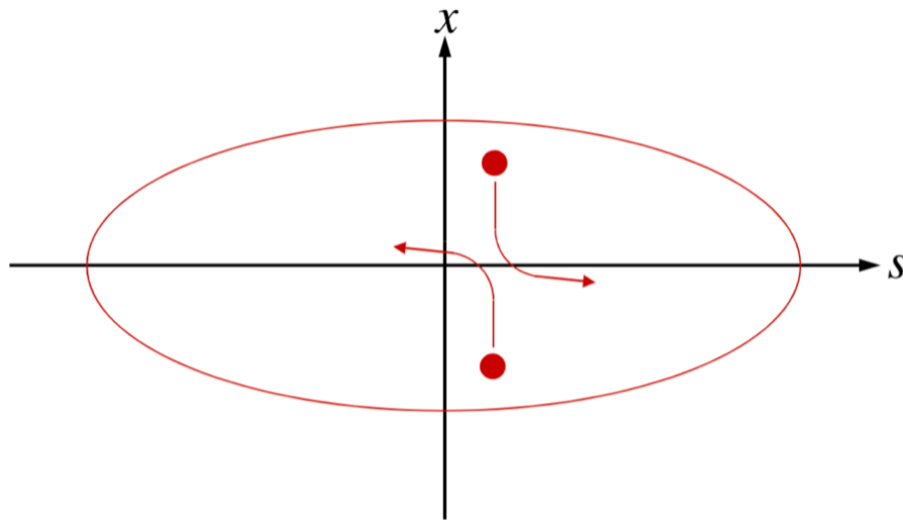
Tüm bu etkiler (ve daha fazlası) **kolektif etkiler** olarak bilinir.

- Demet içerisinde, parçacıklar arasındaki etkileşmelerden dolayı ortaya çıkan etkiler, **kolektif etkiler** (collective effects) olarak isimlendirilir. Kolektif etkiler, **paketçiğin** kendi içerisindeki etkileşmeleri, **paketçikler arasındaki** etkileşmeleri, demetin **hızlandırıcı yapısı** ile etkileşmeleri kapsar. Bu etkiler, **betatron ayar değişimi**, **emittans büyümesi** ve **demet kayıpları** gibi istenmeyen sonuçlara neden olabilir.

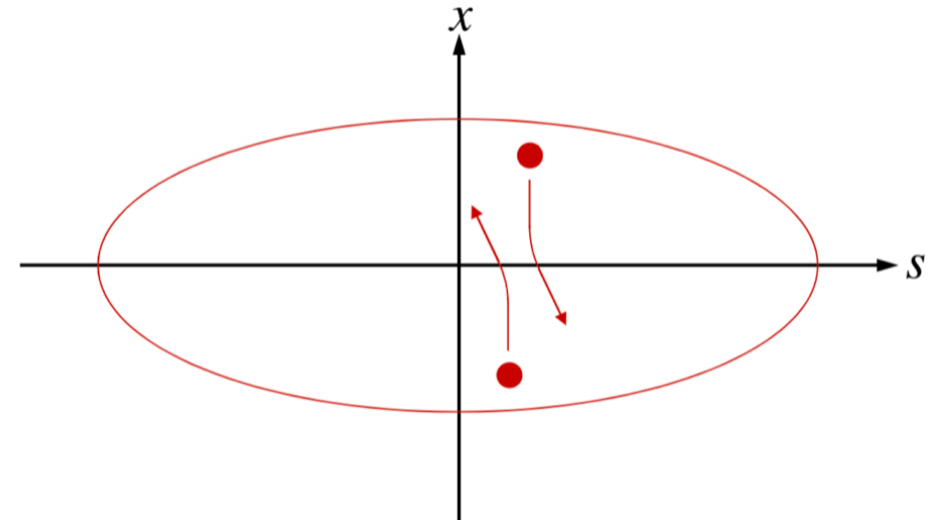
## ○ Kolektif etkiler dendiğinde aklımıza neler gelmeli?

- Demet-içi saçılım (intra-beam scattering)
- Uzay yükü (space charge)
- Boyuna mikro-dalga kararsızlığı (longitudinal micro-wave instability)
- Enine mod bağlaşım kararsızlığı (transverse mode coupling instability)
- İyon etkileri
- Elektron bulutu
- Koherent sinkrotron ışınımı
- ...

- Hızlandırıcılarda, dar bir hacime **birçok parçacık sıkıştırıldığından** demet içerisindeki parçacıkların birbirleriyle **çarpışma olasılığı** artar. Yüksek parçacık yoğunluklu paketçik içerisinde, iki parçacık birbirine çok yaklaştığında, **yüklerinden dolayı etkileşim**, genel anlamda sürekli yük dağılımı olarak değerlendirilen paketçiğin elektromanyetik alanında, ihmal edilemez yerel değişimlere neden olur. Bunlar demet içi çarpışmalar olarak ifade edilir ve demet içerisinde gözlemlenebilir bazı etkilere neden olur.



Touschek etkisi



Demet-içi saçılma (Intra-beam scattering)

- Temelde, demet-içi saçılım etkisi, demetin **enerji yayılımını** artırır ve dispersiyonun varlığından dolayı bu ayrıca **emittans büyümesine** neden olur.
- Hızlandırıcılarda bu etkiyi anlamak için **Standart Pwinski** metodu başta olmak üzere çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Temelde bu yöntemlerin hepsi, demette demet-içi saçılım kaynaklı değişimi ifade etmek için kullanılan **büyüme oranını** (growth rate) hesaplamayı hedefler.
- Boyuna, yatay ve düşey yönde büyüme oranları sırasıyla şu şekilde ifade edilir

$$\frac{d\sigma_\delta}{dt} = \frac{1}{T_\delta} \sigma_\delta \quad \frac{d\epsilon_x}{dt} = \frac{2}{T_x} \epsilon_x \quad \frac{d\epsilon_y}{dt} = \frac{2}{T_y} \epsilon_y$$

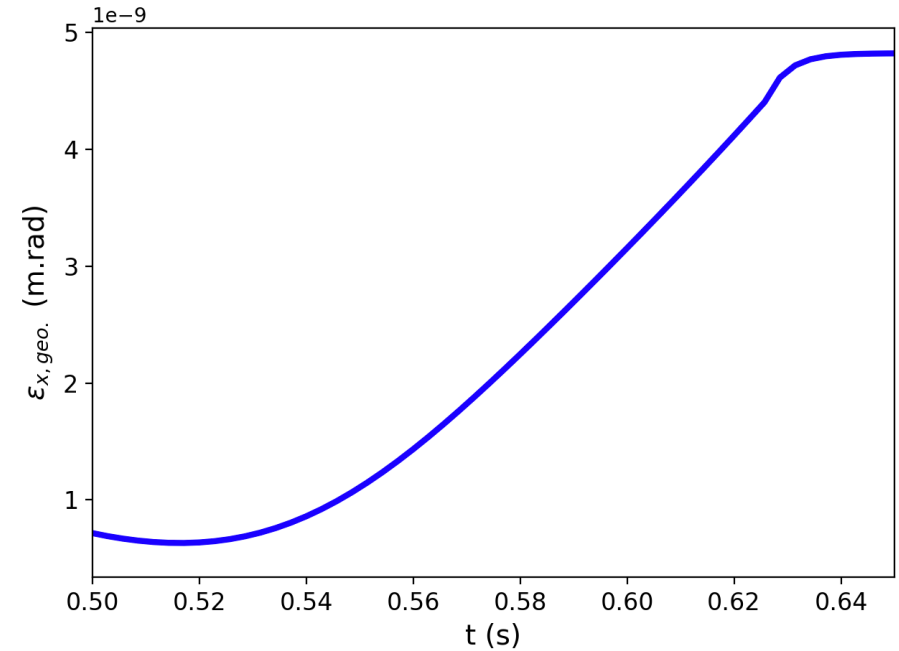
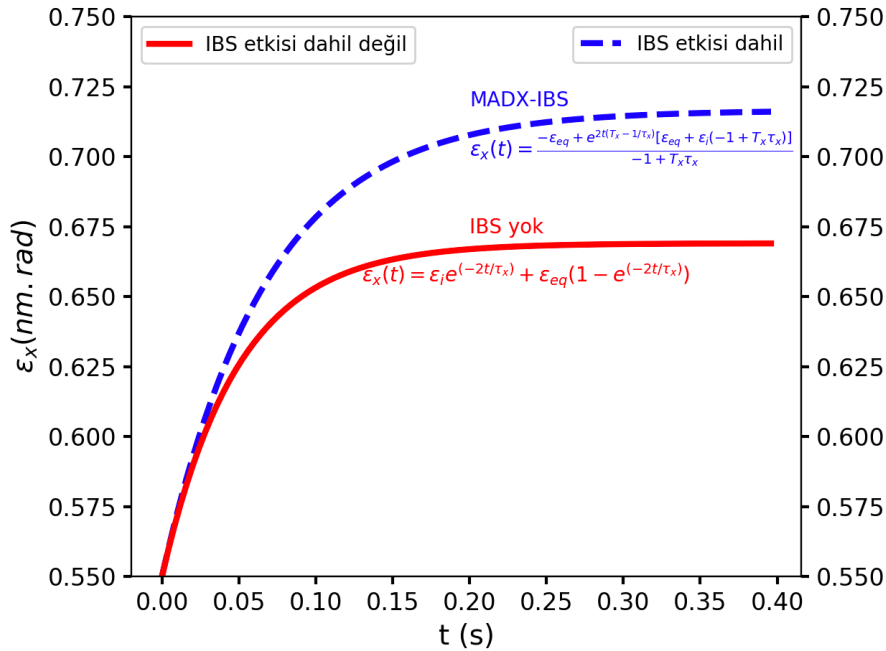
Büyüme oranı

$$\frac{d\epsilon}{dt} = -\frac{1}{\gamma(t)} \frac{d\gamma(t)}{dt} \epsilon - \frac{2}{\tau_x} \epsilon + \frac{2}{\tau_x} \epsilon_{eq} + \frac{2}{T_i} \epsilon$$

IBS etkisi

- Temelde, demet-içi saçılım etkisi, demetin enerji yayılımını artırır ve dispersiyonun varlığından dolayı bu ayrıca emittans büyümesine neden olur.

$$\frac{d\epsilon}{dt} = -\frac{1}{\gamma(t)} \frac{d\gamma(t)}{dt} \epsilon - \frac{2}{\tau_x} \epsilon + \frac{2}{\tau_x} \epsilon_{eq} + \frac{2}{T_i} \epsilon$$



# İyon Etkisi (Ion effects)

- Hızlandırıcı içerisindeki parçacıklar, vakum haznesi olarak isimlendirilen, vakumlanmış bir hazne içerisinde hızlandırıcı elemanlarının etkileri ile bir yörüngede hareket eder.
- **Vakum haznesi içerisinde**, mutlak bir boşluk elde edilemeyeceğinden, halen **kalan gazlar** bulunur. Bunlar **hızlandırıcı içerisinde dolanan elektron demeti** tarafından **iyonize** hale getirilebilir. Bu iyonlar arasında, **kritik kütle** denen bir değeri geçen iyonlar hızlandırıcı içerisinde hareket eden demetin alanında **hapsolür**. Bu **hapsolan iyonlar** elektron demetini etkiler ve **ayar kaymasına** neden olur.

# İyon Etkisi (Ion effects)

- Vakum haznesi içerisinde**, mutlak bir boşluk elde edilemeyeceğinden, halen **kalan gazlar** bulunur. Bunlar **hızlandırıcı içerisinde dolanan elektron demeti** tarafından **iyonize** hale getirilebilir. Bu iyonlar arasında, **kritik kütle** denen bir değeri geçen iyonlar hızlandırıcı içerisinde hareket eden demetin alanında **hapsolür**. Bu **hapsolan iyonlar** elektron demetini etkiler ve **ayar kaymasına** neden olur.

The critical mass for trapping of a singly charged ion is:

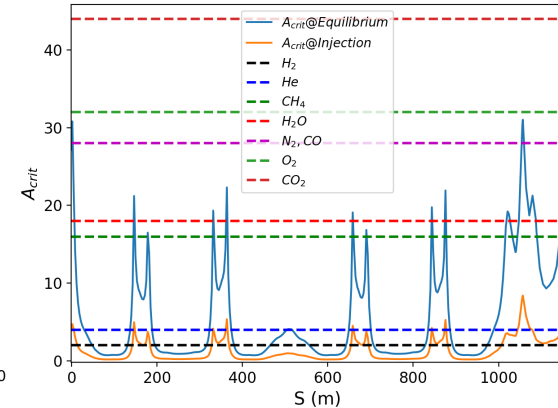
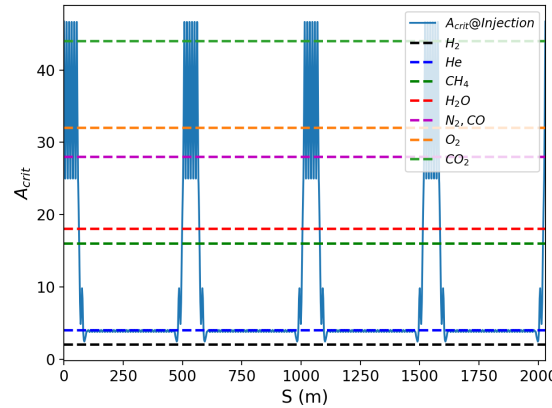
$$A_{crit} \cong \frac{N_b \Delta T_b c r_p}{2\sigma_y(\sigma_x + \sigma_y)}$$

Tune shift introduced by the ion cloud at the end of the train:

$$\Delta Q_{ion} \cong \frac{N_b n_b r_e C}{\pi \gamma \sqrt{\epsilon_x \epsilon_y}} \left( \frac{\sigma_{ion} p}{k_B T} \right)$$

Rising time of the fast ion instability:

$$\tau_{inst} \cong \frac{0.1 \gamma \sigma_x \sigma_y}{N_b n_b c r_e \beta_y \sigma_{ion}} \left( \frac{k_B T}{p} \right) \left( \sqrt{\frac{8}{\pi}} \right)$$



Parameters	Alternative PBR	SPS as PBR
$\Delta Q_{ion}$	0.002	0.009
$\tau_{inst}$ [t <sub>rev</sub> ]	134	61

- Vakum düzeyi önemlidir.
- Küçük ayar kayması ve geribildirim sistemleri ile telafi edilecek kadar uzun çıkış zamanı (rise time) olması gereklidir.

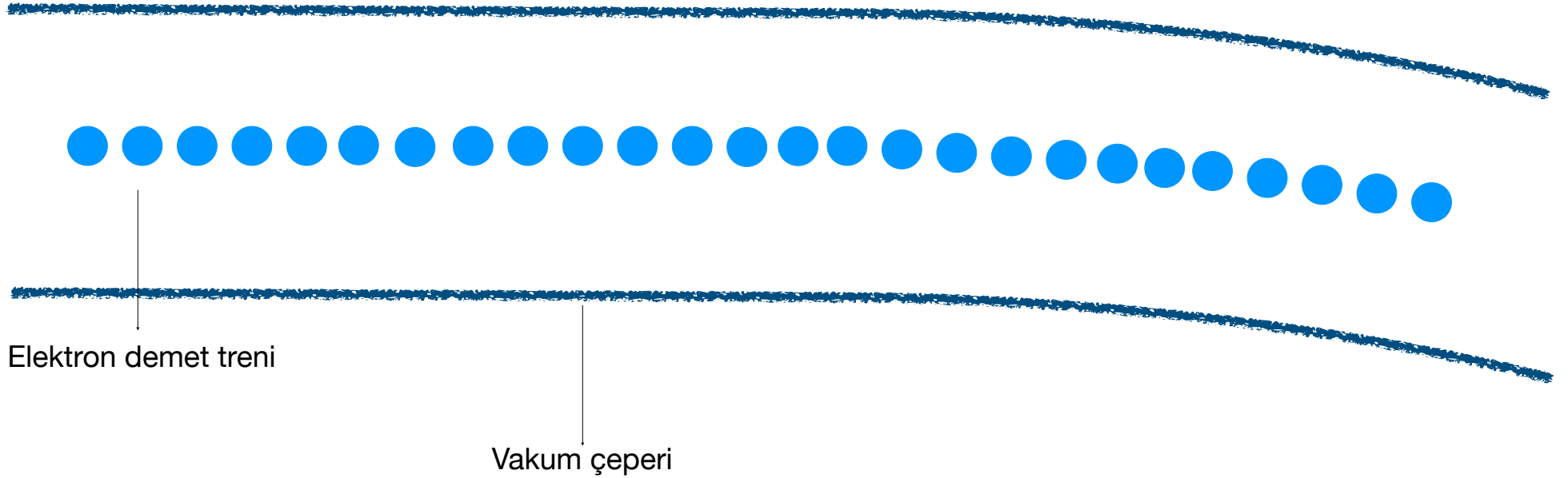


# Elektron Bulutu (e-cloud)

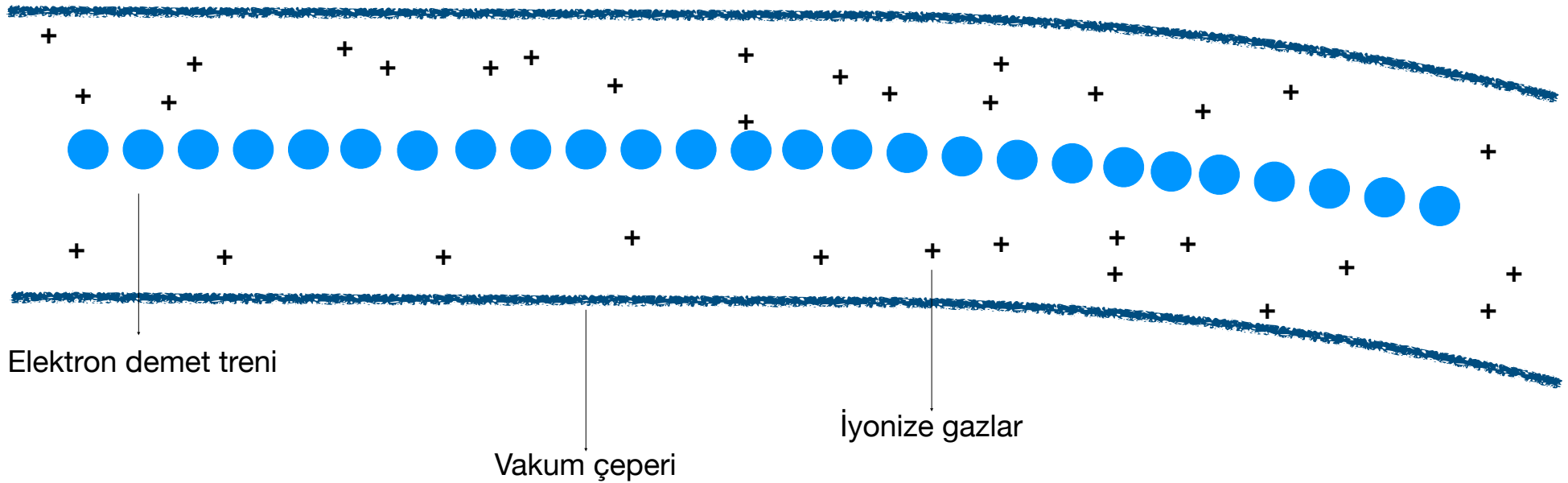


Elektron demet treni

# Elektron Bulutu (e-cloud)

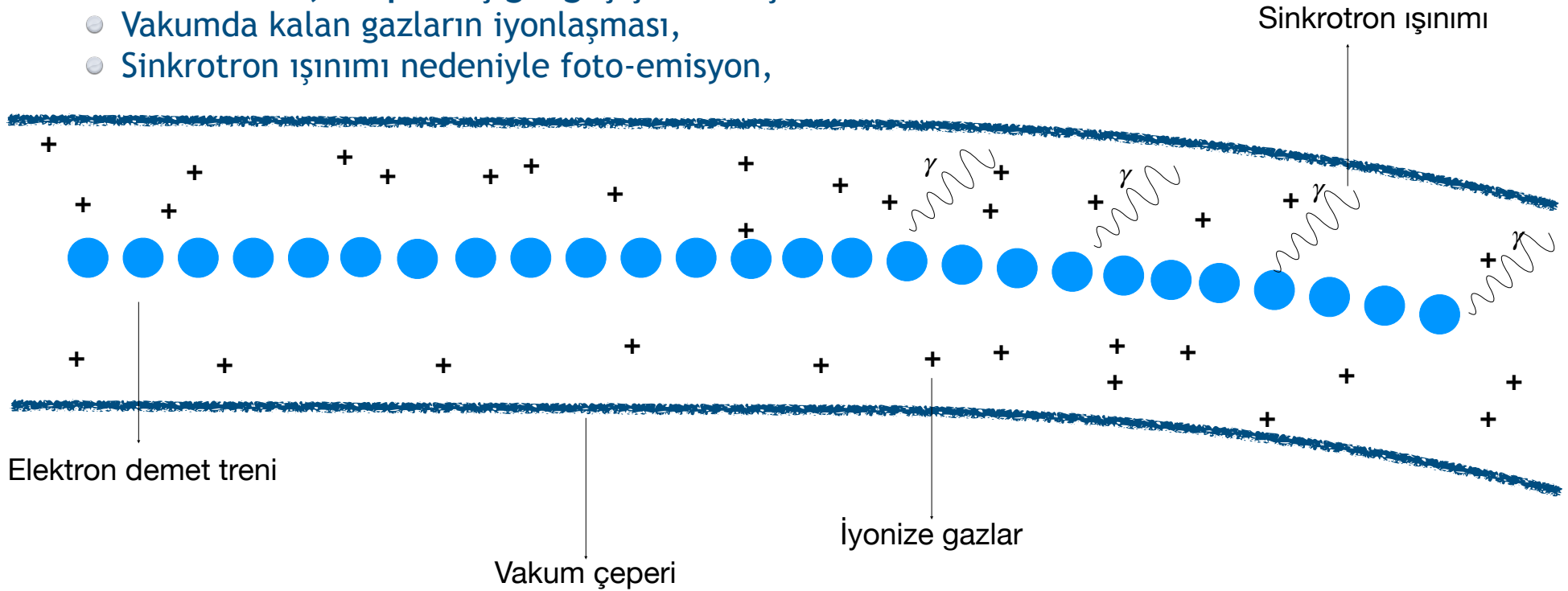


- Birincil elektronlar, bir paketçiğin geçişi ile oluşturulabilir:
  - Vakumda kalan gazların iyonlaşması,



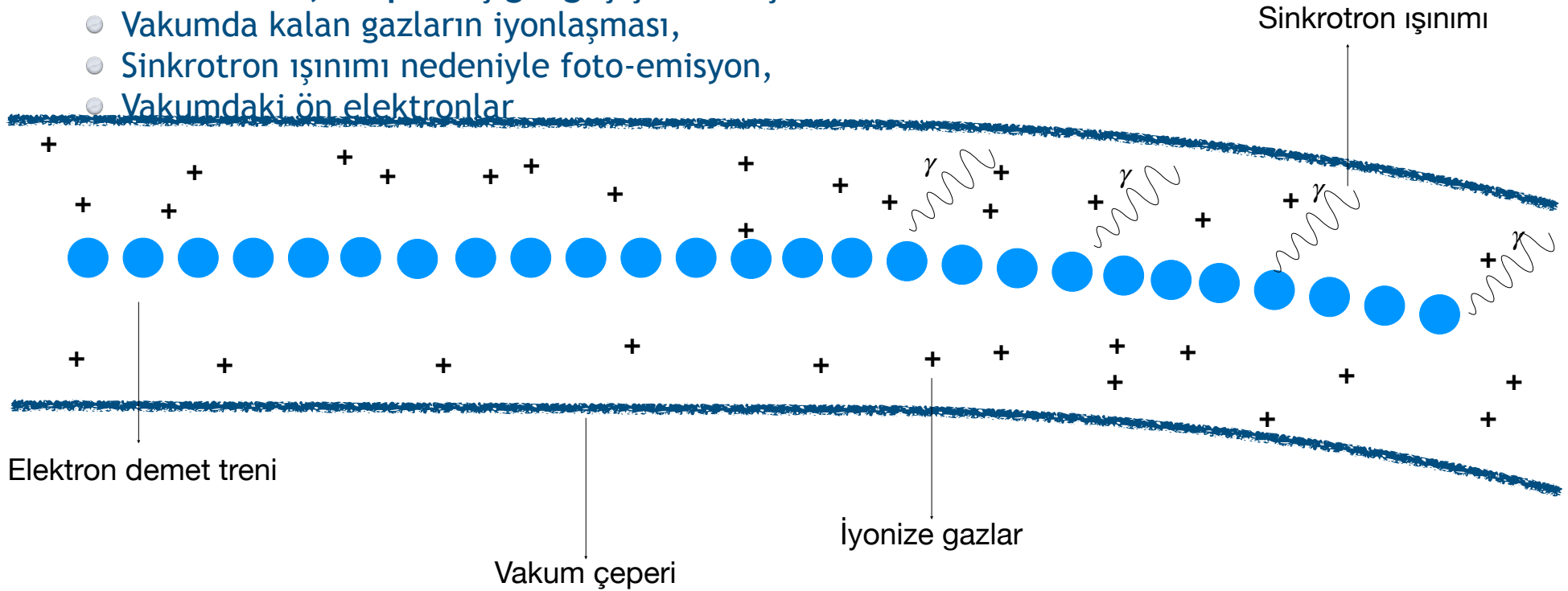
• Birincil elektronlar, bir paketçiğin geçişi ile oluşturulabilir:

- Vakumda kalan gazların iyonlaşması,
- Sinkrotron ışınımı nedeniyle foto-emisyon,



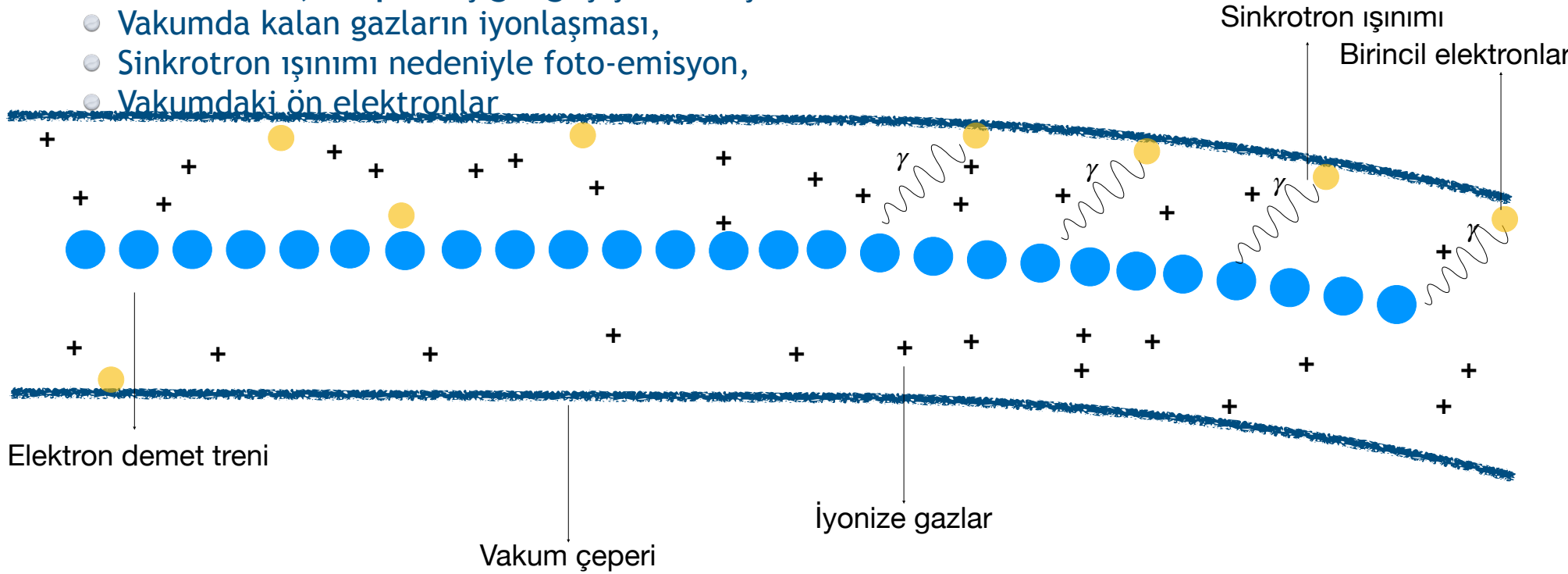
• Birincil elektronlar, bir paketçiğin geçişi ile oluşturulabilir:

- Vakumda kalan gazların iyonlaşması,
- Sinkrotron ışınımı nedeniyle foto-emisyon,
- Vakumdaki ön elektronlar



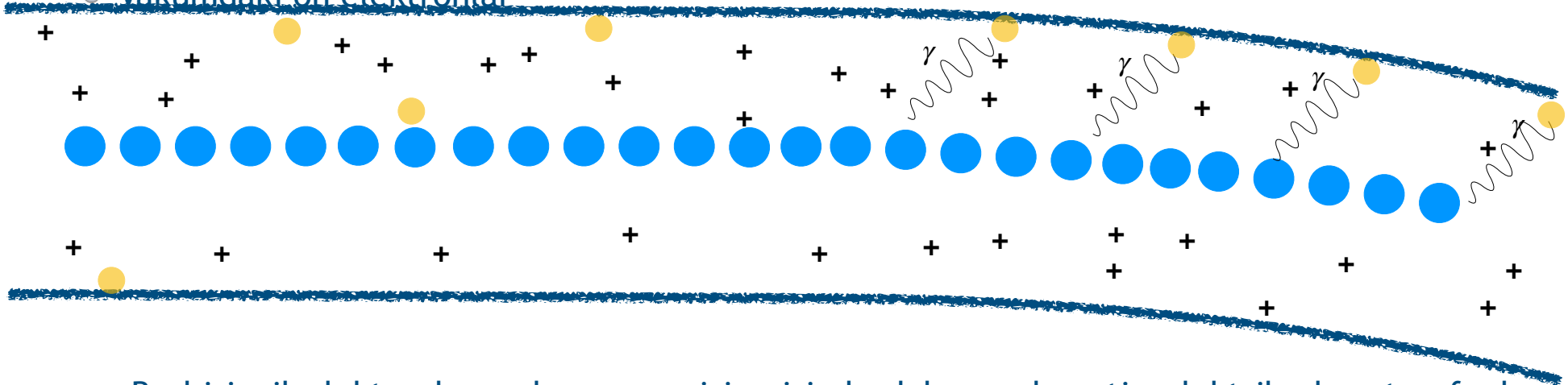
• Birincil elektronlar, bir paketçiğin geçişi ile oluşturulabilir:

- Vakumda kalan gazların iyonlaşması,
- Sinkrotron ışınımı nedeniyle foto-emisyon,
- Vakumdaki ön elektronlar



- Birincil elektronlar, bir paketçiğin geçişi ile oluşturulabilir:

- Vakumda kalan gazların iyonlaşması,
- Sinkrotron ışınımı nedeniyle foto-emisyon,
- Vakumdaki ön elektronlar

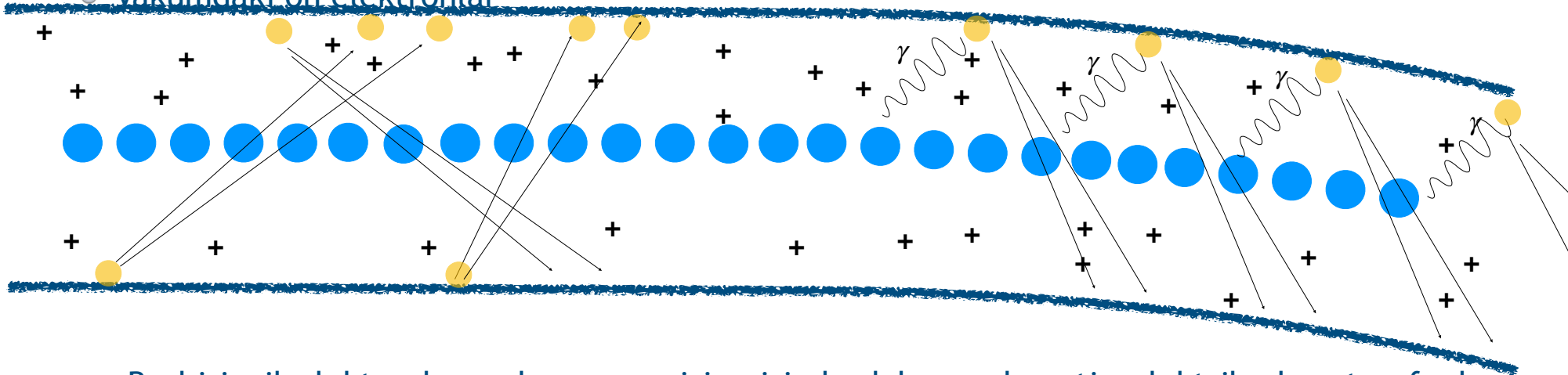


- Bu birincil elektronlar, vakum çeperi içerisinde dolanan demetin elektrik alanı tarafından hızlandırılabilir



- Birincil elektronlar, bir paketçiğin geçişi ile oluşturulabilir:

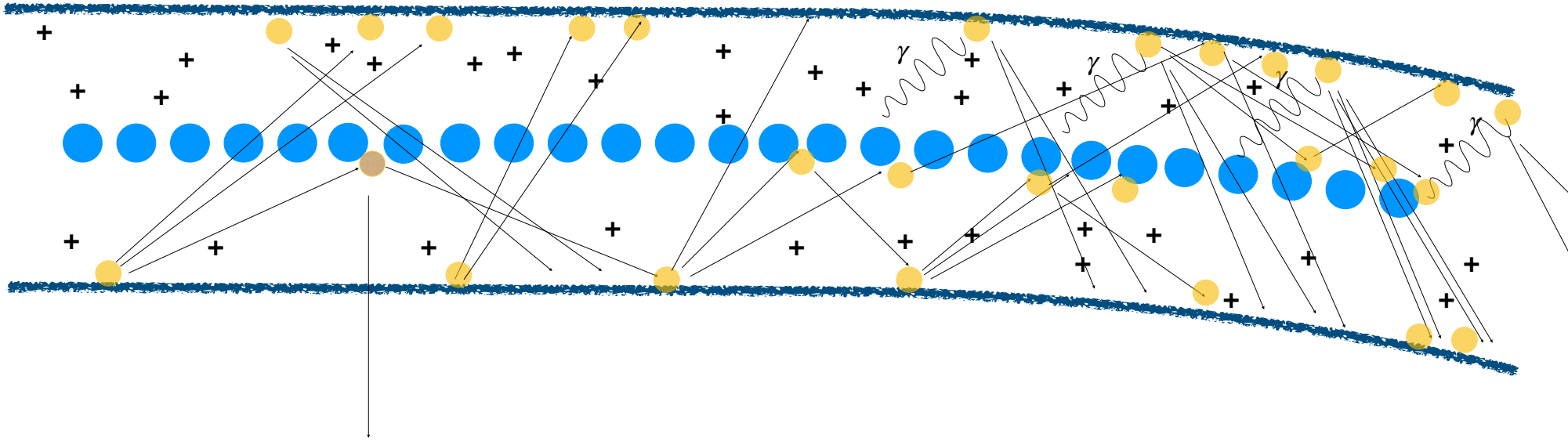
- Vakumda kalan gazların iyonlaşması,
- Sinkrotron ışınımı nedeniyle foto-emisyon,
- Vakumdaki ön elektronlar



- Bu birincil elektronlar, vakum çeperi içerisinde dolanan demetin elektrik alanı tarafından hızlandırılabilir
- Hızlanan elektronlar vakum çeperine çarpar
- İkincil elektronlar oluşabilir
- Bu ikincil elektronlar düşük enerjilidir ( $\sim 10$  eV) ve genelde çepere ulaştıklarında başka elektronlar üretmeden söğürülürler.

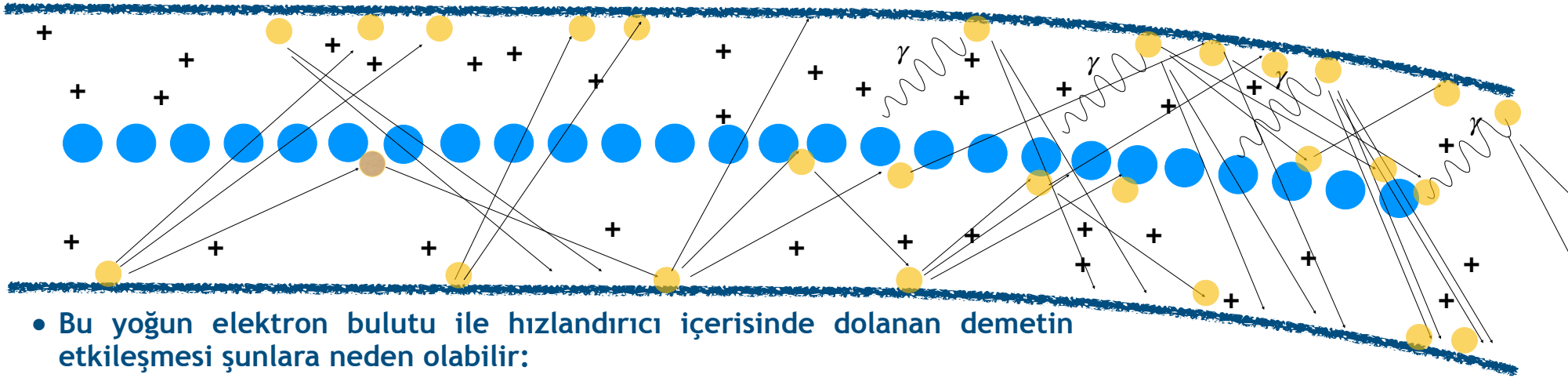
# Elektron Bulutu (e-cloud)

- Ama, hızlandırıcıda dolanan sonraki paketçiğin geliş zamanına bağlı olarak, ikincil elektronlar vakum çeperine ulaşmadan tekrar hızlandırılarak daha fazla ikincil elektron oluşmasına neden olabilir,
- Eğer paketçik treni yeterince uzunsa, elektron çığ etkisi oluşarak çeperde yoğun bir elektron bulutu oluşumuna neden olabilir.



Çeperre ulaşp soğurulmadan önce demet tarafından tekrar hızlandırılan ikincil parçacık

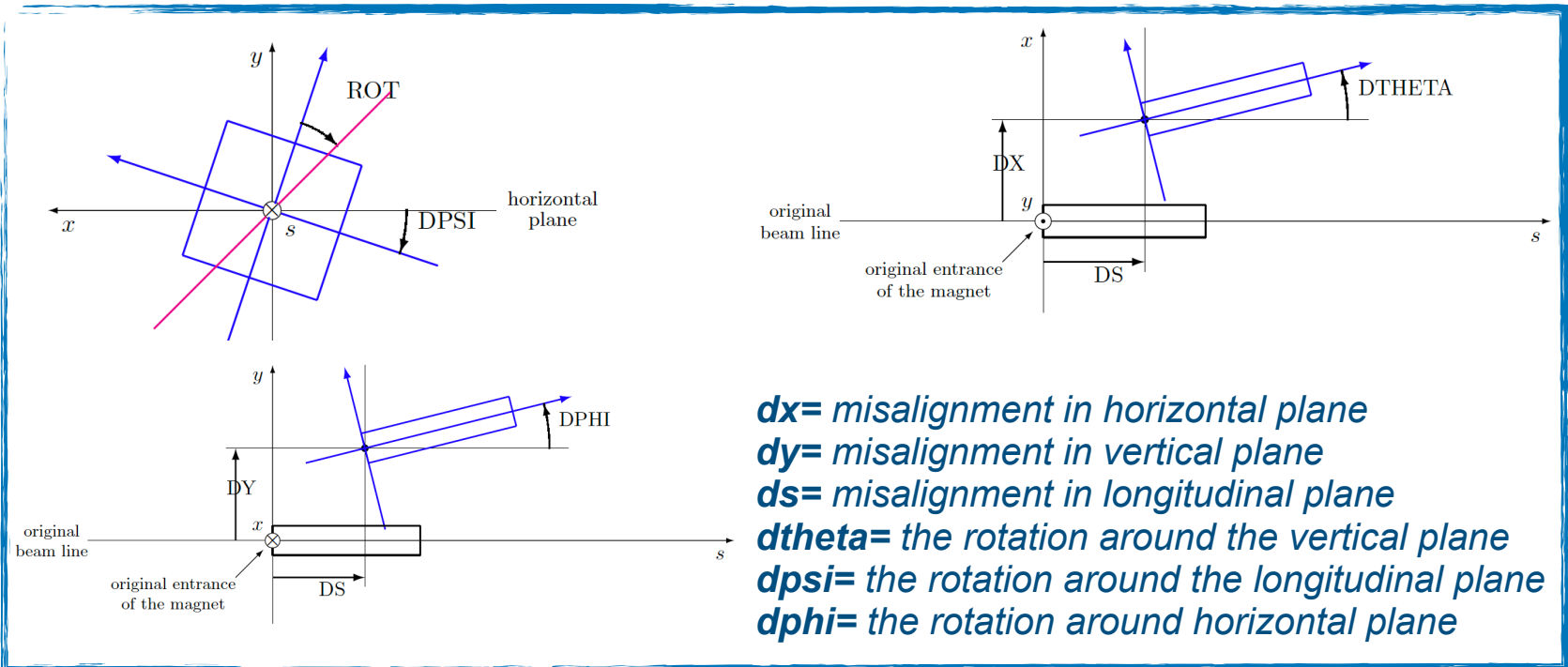
- Ama, hızlandırıcıda dolanan sonraki paketçiğin geliş zamanına bağlı olarak, ikincil elektronlar vakum çeperine ulaşmadan tekrar hızlandırılarak daha fazla ikincil elektron oluşmasına neden olabilir,
- Eğer paketçik treni yeterince uzunsa, elektron çığ etkisi oluşarak çeperde yoğun bir elektron bulutu oluşumuna neden olabilir.

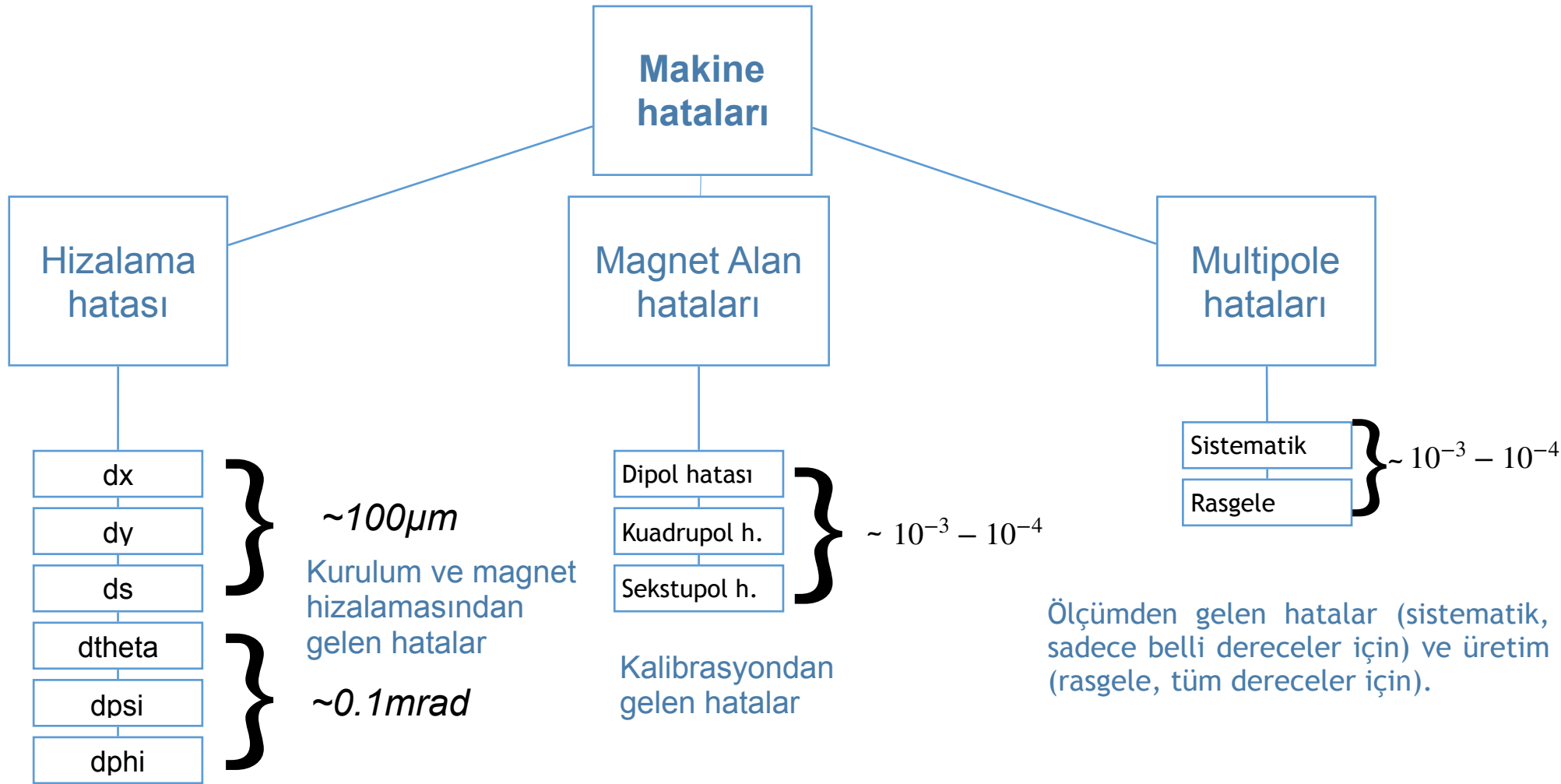


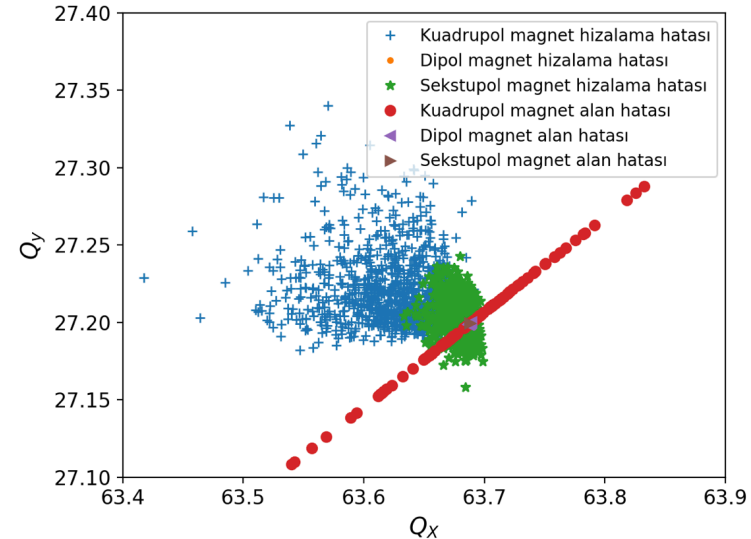
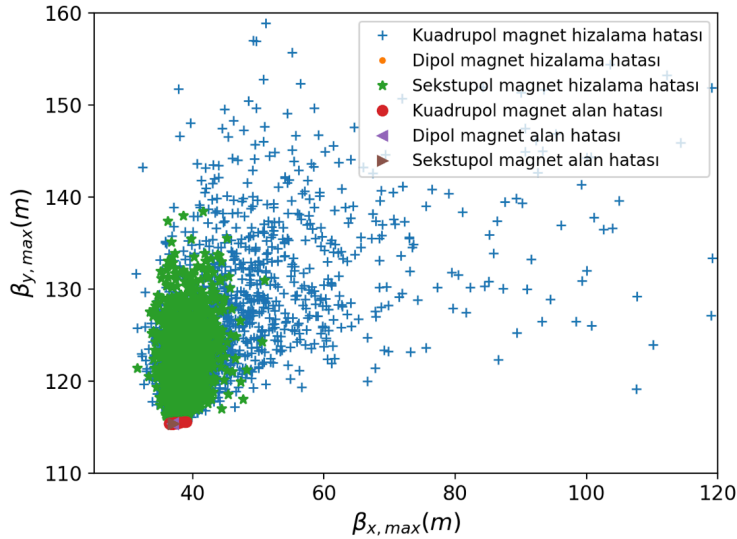
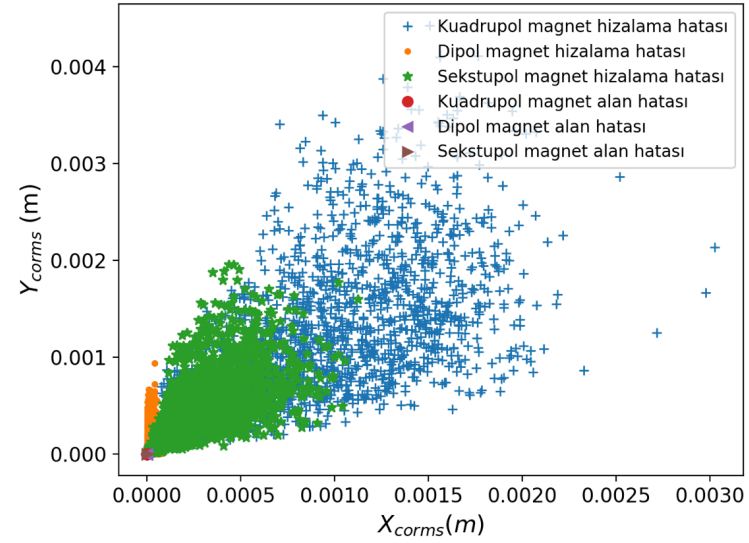
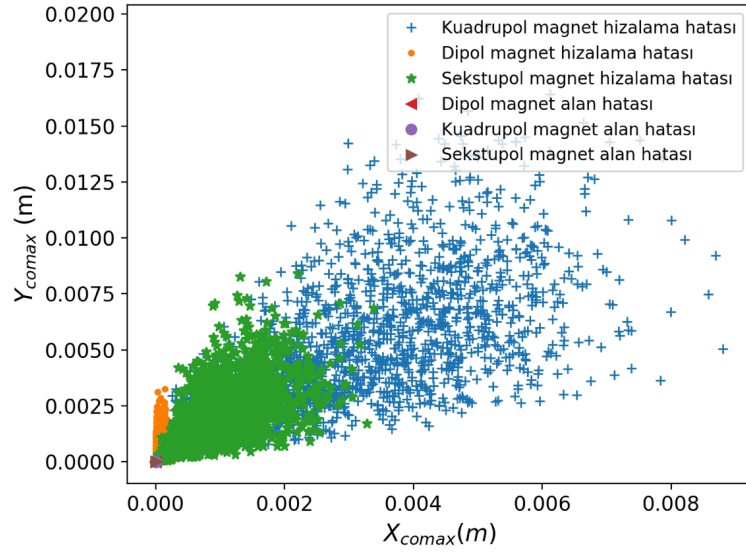
- Bu yoğun elektron bulutu ile hızlandırıcı içerisinde dolanan demetin etkileşmesi şunlara neden olabilir:

- Enine kararsızlık,
- Betatron ayarı kayması,
- Demet kaybı,
- Enine emittans bozunumu (enine emit. büyümesi),
- Enerji kayması,
- Vakum kaybı,
- Güç birikimi (heat load),
- Sinkrotron faz kayması.

- Hızlandırıcı içerisindeki elemanların **kusurları** (hataları) nedeniyle parçacıkların çembersel hızlandırıcı içerisinde takip ettikleri **yörüngede bozulmalar**, demet **parametrelerinde değişiklikler**, betatron **ayar kayması**, betatron **fonksiyonlarının bozulması**, **periyodikliğin bozulması** ve **dinamik aralık için küçülme** gibi istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilir.
- Bu nedenle, dinamik aralık için daha **gerçekçi sonuçlar** elde etmek adına, **magnet alan hataları**, **multipol alan hataları** ve **hizalama hataları** hesaplamalara dahil edilmelidir.

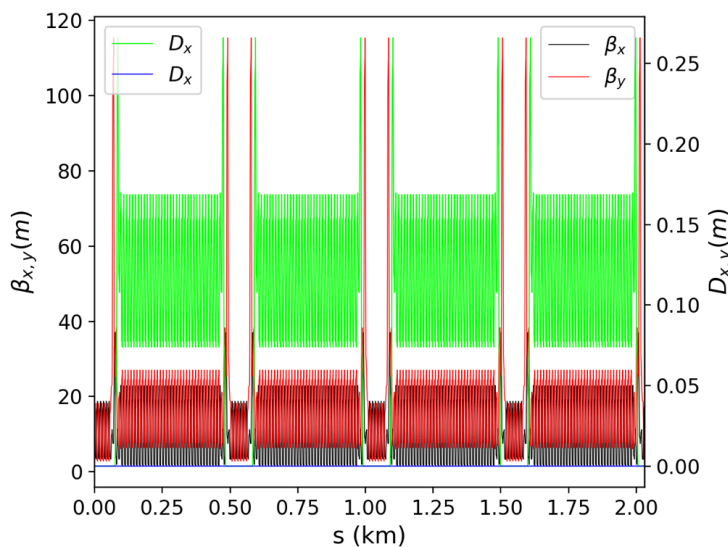
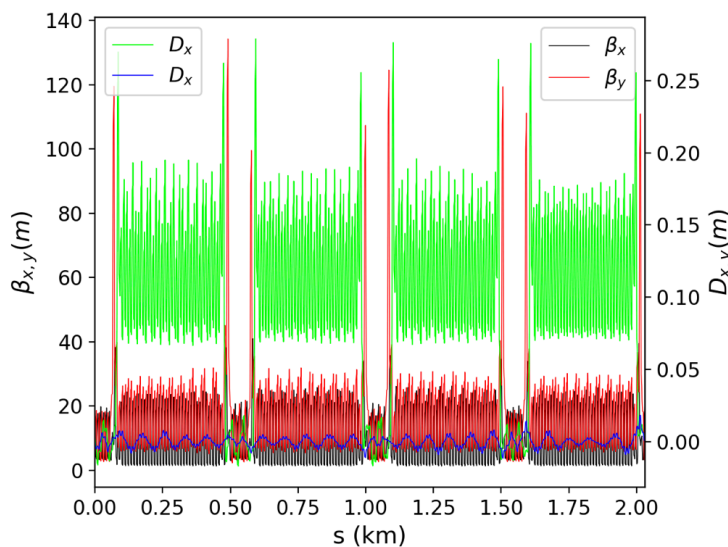
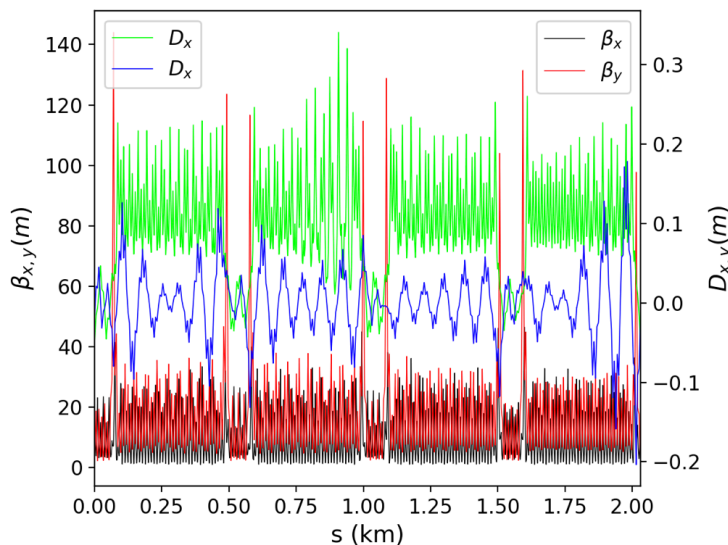
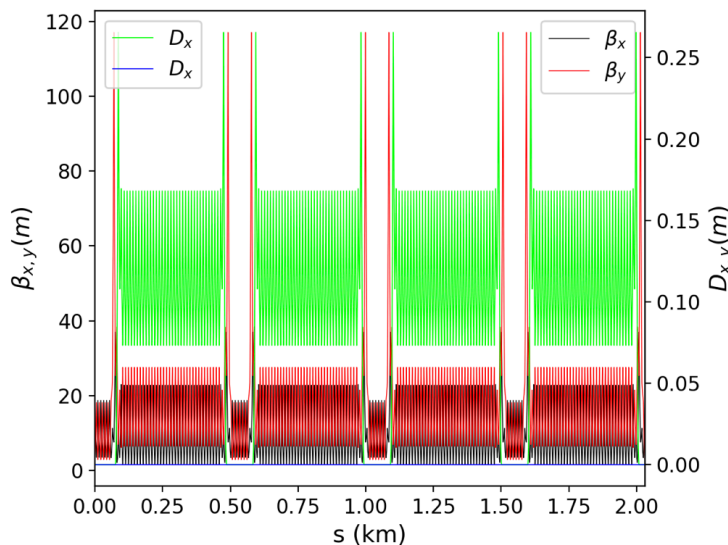




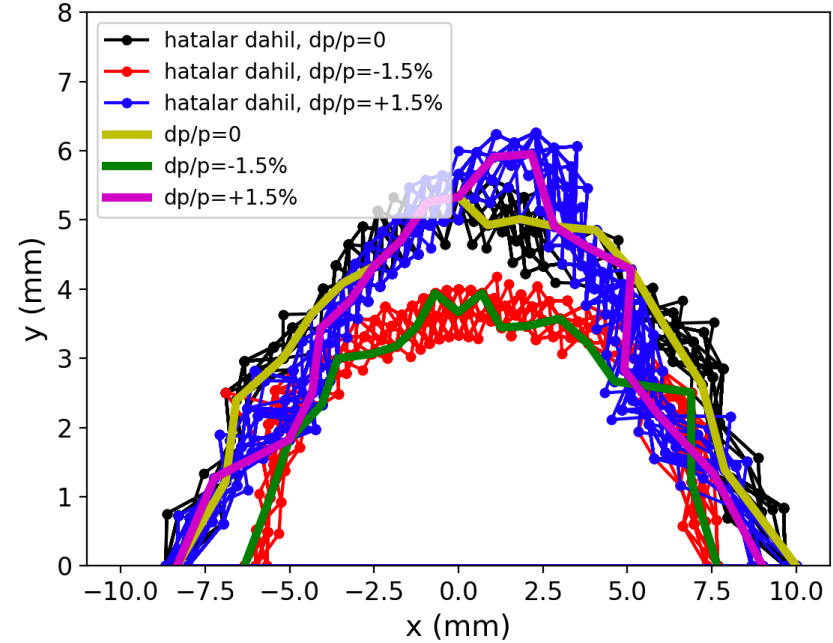
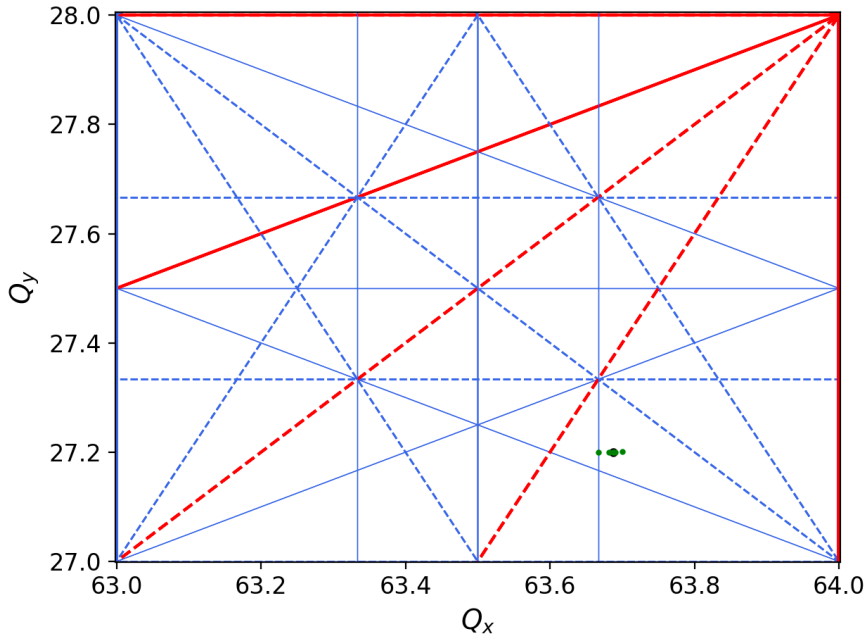








- **Hatalar dahil** edilerek, düzeltme ve eşleme prosedürlerinin tamamlanmasının ardından, dinamik aralık hesabı yapılır.
- Parçacıklar, farklı **başlangıç noktalarından başlatılarak yeterince** (yaklaşık 1 sönüm zamanı) tur atırılarak takip edilir.



Dinamik aralığı grafiğinde sarı çizgi **hatasız durumdaki** dinamik aralığı gösterir, yeşil ve magenta çizgiler **ideal durumdan sapmış parçacıklar** (off-momentum) için dinamik aralığı temsil eder ve kırmızı, mavi ve siyah çizgiler ise **hataların dahil** edilmesindeki durumdaki dinamik aralığı gösterir.

• Bir çembersel hızlandırıcı tasarımında dikkat edilmesi ve takip edilmesi gereken temel aşamalar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Gereklilik ve sınırlamalar
- Çembersel hızlandırıcı taslak planı
- Lineer tasarım
- Lineer olmayan tasarım
- Hatalar
- Kolektif etkiler
- Sinkrotron ışınımı

- Dersin başında söz verdiğim üzere,
  - Dairesel hızlandırıcıların amacı ve farklı dairesel hızlandırıcıların karşılaştırılması yapıldı: Betatron, mikrotron, siklotron, sinkrotron, ...
  - Dairesel hızlandırıcılarda temel parametreler açıklandı
  - FODO örgüsü tanıtıldı ve diğer küçük emittans örgü tipleri (DBA, TBA, TME vb.) ile karşılaştırıldı
  - Dairesel hızlandırıcılarda kabul konusu irdelendi
  - Kollektif etkiler tanıtıldı (bazıları detaylandırıldı)
  - Pratik hesaplamalar ve optimizasyon adımları özetlendi
  - Daha gerçekçi hesaplamaları için hatalar tanıtıldı