Hızlandırıcılarda Demet Diagnostiğine Giriş

Veli Yıldız

TARLA
TÜRK HIZLANDIRICI VE IŞINIM LABORATUVARI

İÇERİK

Aşağıdaki konulara bir giriş yapacağız:

- Demet ölçümüne ve demet ölçüm aletlerine neden ihtiyaç duyuyoruz?
- Hangi demet parametreleri hangi aletlerle ve nasıl tekniklerle ölçülür?

HIZLANDIRICILARDA DEMET DİAGNOSTİĞİ İHTİYACI

Hızlandırıcının devreye alınması ve optimizasyonu

- Demet parametrelerine bağlı hızlandırıcı optimizasyonu.
- Demet parametrelerinin karakterizasyonu (olabildiğince ayrıntılı).

Hızlandırıcının kurulum amacına yönelik kullanılması

- Günlük demet parametreleri kontrolleri.
- Gerektiğinde hızlandırıcının kolay ve hızlı bir şekilde tekrar optimizasyonuna olanak vermek.
- Makine koruma sistemine sinyal vermek (Örneğin demet kayıplarının ölçülmesi)

- Yükeysek performanslı, <u>kompleks demet parametreleri</u> bilgisini (örnek: emittance) verebilecek demet tanı yöntemleri
- Demet ölçümleri demeti etkileyebilir (durdurabilir).

- Hızlı, basit, güvenilir, demeti etkilemeyen ölçüm aletleri.
- <u>Demetin temel parametrelerini ölçebilen</u> ölçüm aletleri.

DEMET PARAMETRELERİNE ÖRNEK

Temel parametrelere örnek:

- Demet akımı
- Enine demet pozisyonu
- Enine demet profili
- Demet enerjisi
- Demet kayıpları (demet parametresi değildir)

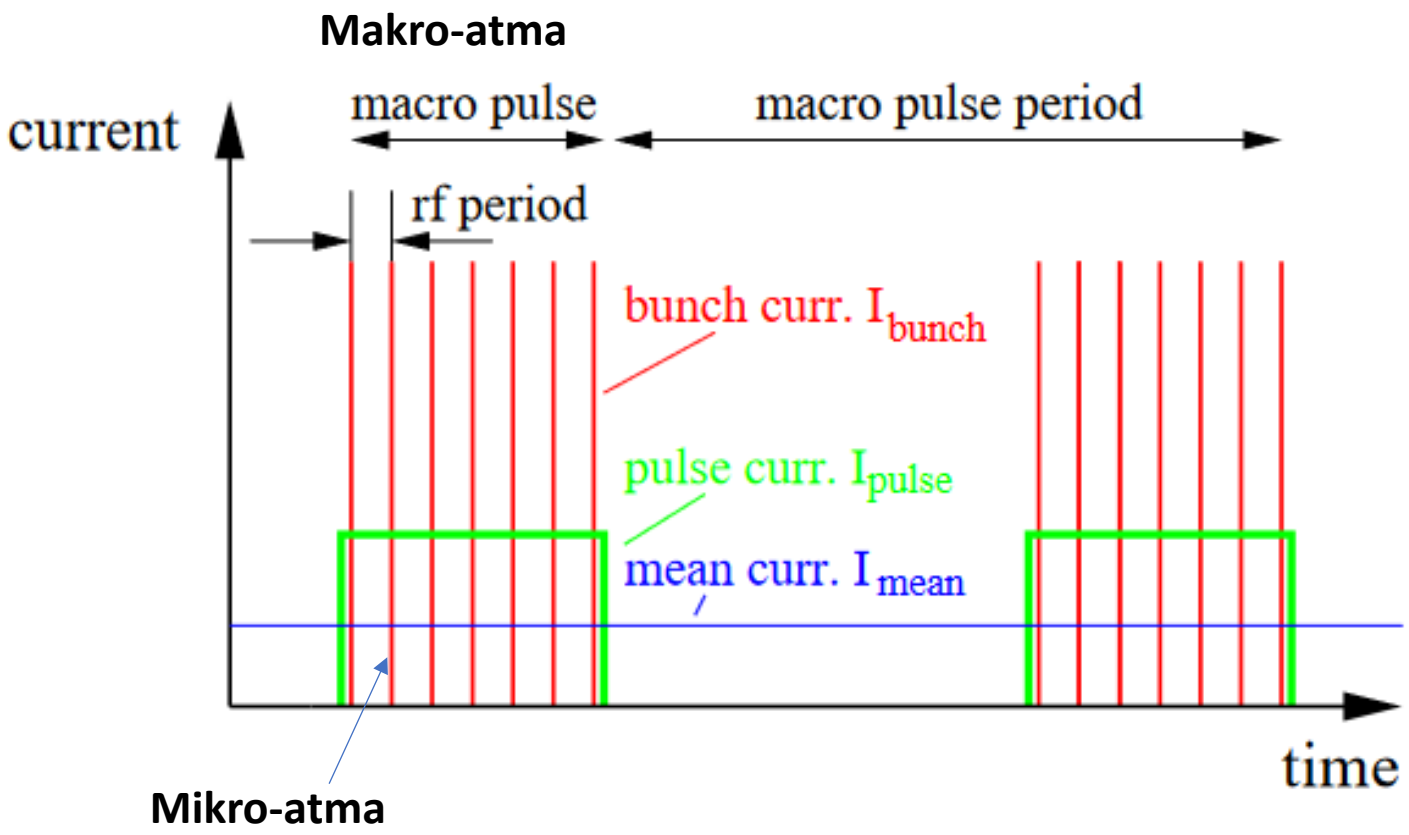
Biraz **daha kompleks parametrelere** örnek:

- Enerji dağılımı
- Boyuna paketçik uzunluğu
- Enine uzaylarda emittance
- Boyuna eksende emittance

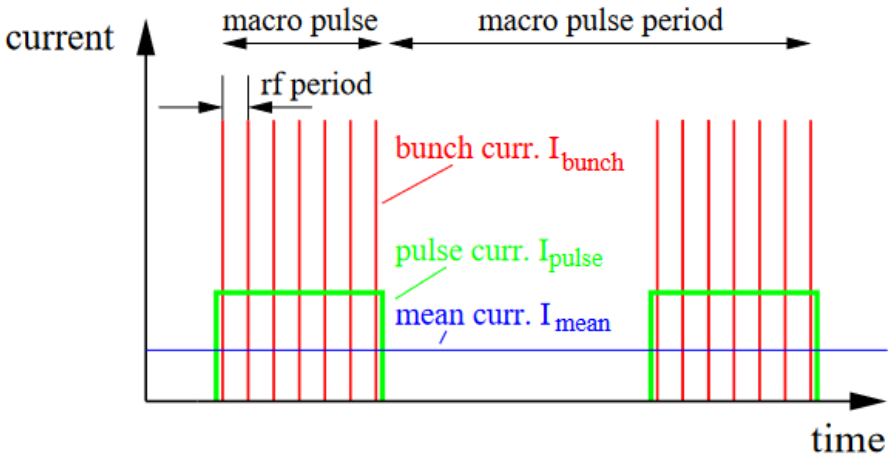
DEMET AKIMI ÖLÇÜMÜ

Parçacıkların zamana bağlı dağılımları.

- Makro-atma : büyük periyotlar halinde gelen paketler
- Mikro-atma: küçük periyotlar halinde gelen paketler.



DEMET AKIMI ÖLÇÜMÜ



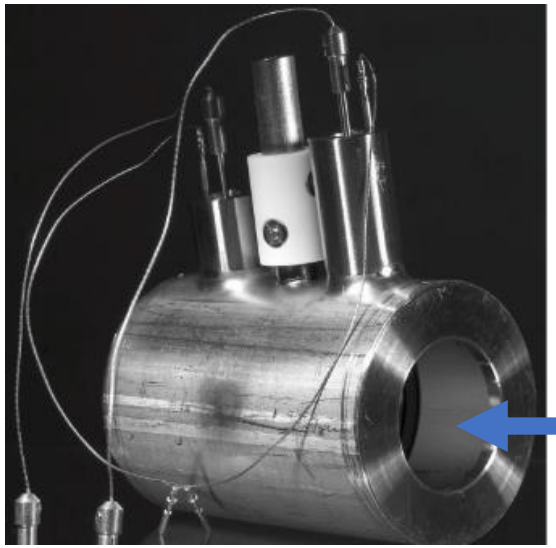
$$Akım = \frac{yük}{zaman}$$

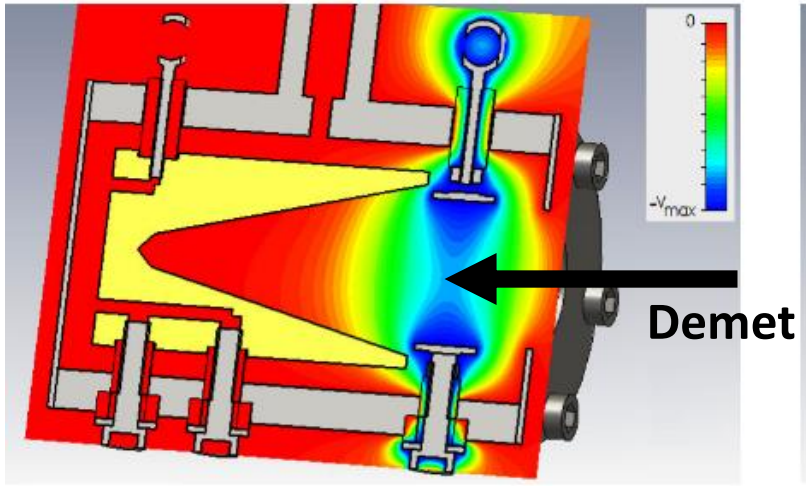
Hangi akımı ölçmek istediğimize bağlı olarak kullanmamız gereken ekipmanlar ve elektronik değişir.

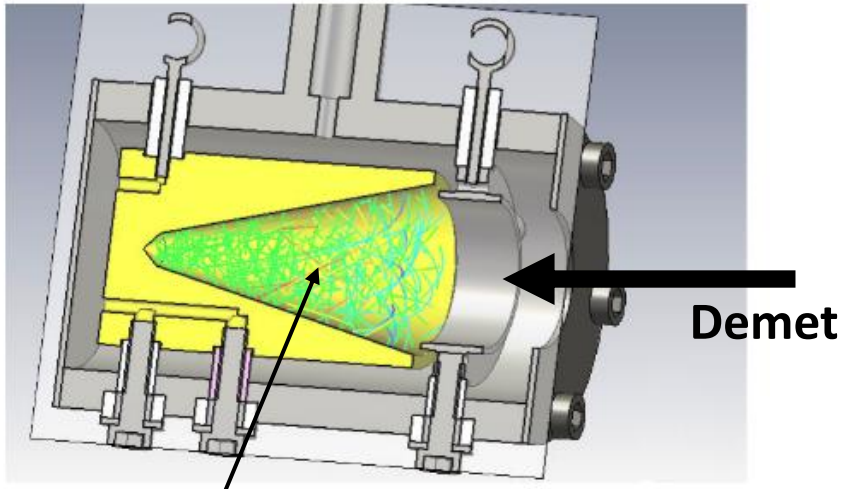
- **Mikro-atma akımı:** pikosaniye-nanosaniye zaman aralıklarında yükü algılayabilen bir sistem ve sayabilen bir elektronik
- **Makro-atma akımı**: mikrosaniye-milisaniye zaman aralıklarında yükü algılayabilen bir sistem ve sayabilen bir elektronik.
- **Demet ortalama akımı:** saniye mertebesi zaman aralıklarında yükü algılayabilen bir sistem ve sayabilen bir elektronik.

DEMET AKIMI ÖLÇÜMÜ FARADAY KABI (FC)

- Parçacıkları metalik bir kapta durdur, birim zamanda yükü say.
- Demeti etkiliyor.
- Ölçmek istediğimiz demet FC yüzeyine çarptıktan sonra ikincil elektronlar yaratır. Bu elektronların dışarı kaçması ölçümü hatalı hale getirir. Bunu engellemek için FC önde bir potansiyel oluşturulup ikincil elektronlar geri itilir.



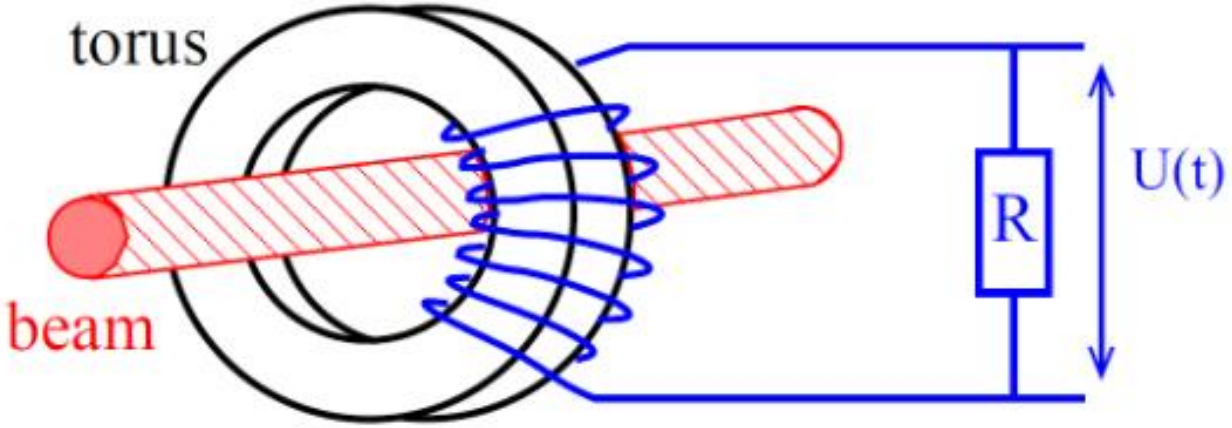




FC içine hapsolan ikincil elektronlar

DEMET AKIMI ÖLÇÜMÜ
DEMET AKIM TRANSFORMATÖRÜ

- İngilizcesi: Beam Current Transformer (BCT)
- Demetin etrafında yarattığı manyetik alanı kullanarak akımı ölçer.
- Transformatörün birincil sarımı: demet, ikincil sarımı: okuma elektroniğinin bağlı olduğu sarım (“simit” etrafında). “simit” yüksek manyetik geçirgenliğe sahip bir materyal olmalı (ferritler kullanılır).

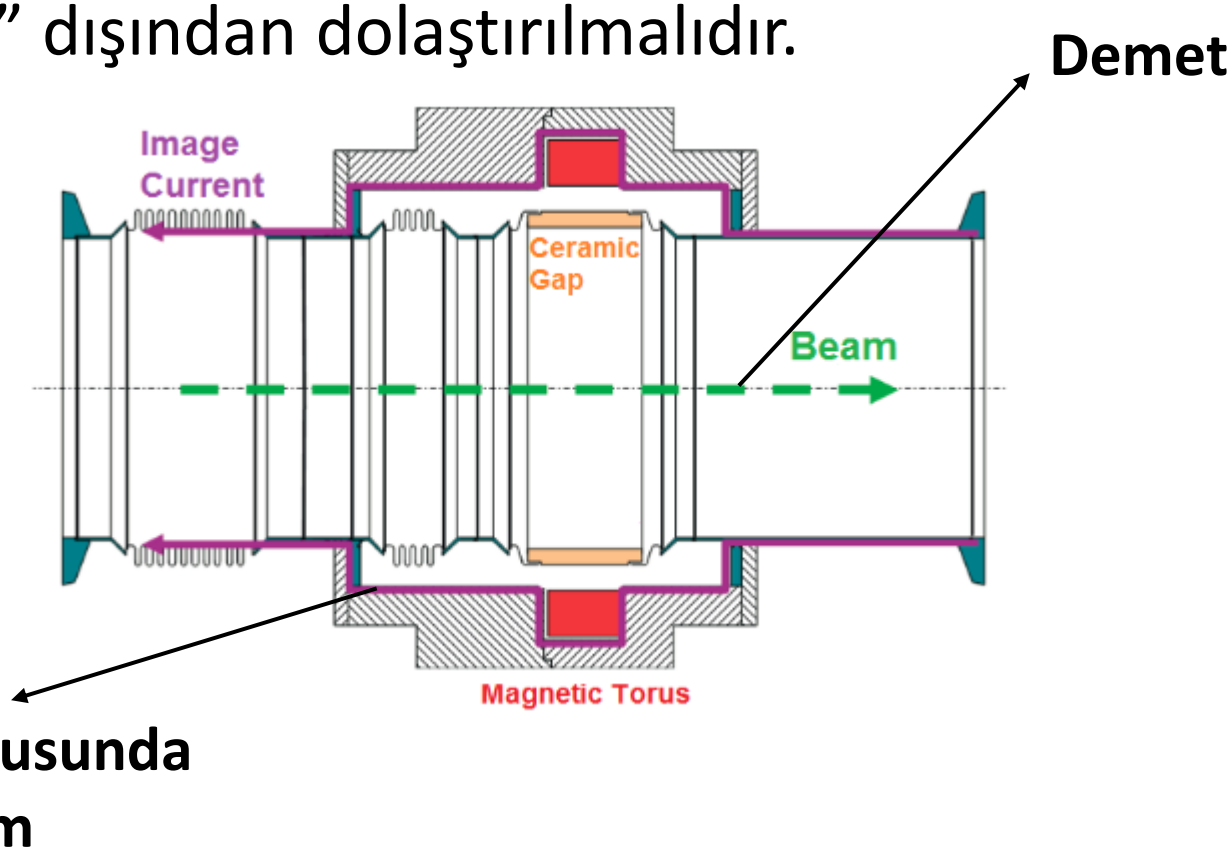


Basitleştirilmiş şekil!

İkincil sarımda oluşan akımı (R direnci etrafında oluşan potansiyeli) ölçersek demet akımını hesaplayabiliriz.

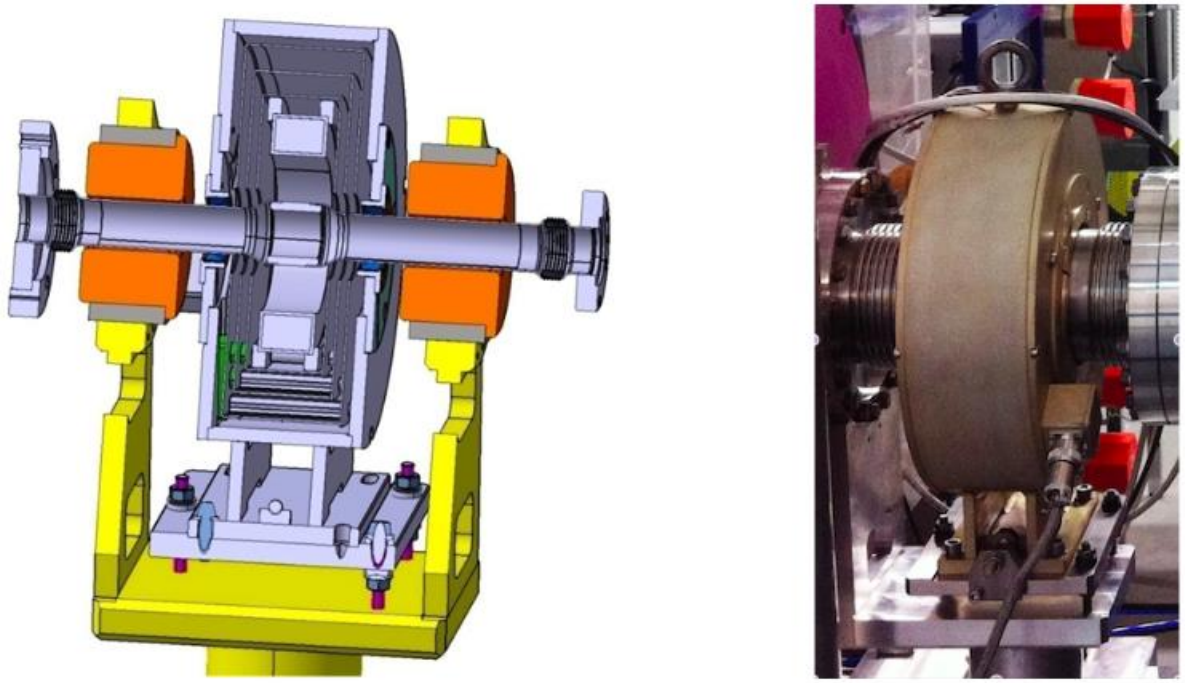
DEMET AKIMI ÖLÇÜMÜ
DEMET AKIM TRANSFORMATÖRÜ

- Metalik demet borusunda demet akımına ters yönde ve aynı büyüklükte bir akım oluşur.
- Bu akım “simidin” dışından dolaştırılmalıdır.



DEMET AKIMI ÖLÇÜMÜ
DEMET AKIM TRANSFORMATÖRÜ

- CERN Linac4 akım transformatörünün çizimi ve fotoğrafı

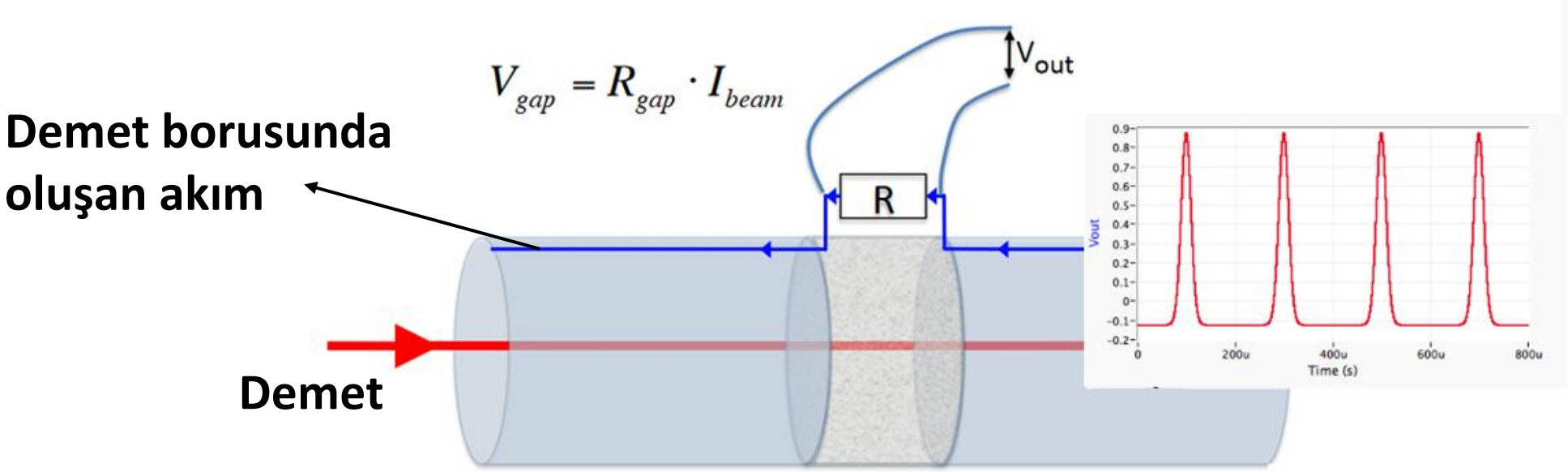


(a) (b)

A drawing and a picture of the Linac4 BCT.

DEMET AKIMI ÖLÇÜMÜ
ÇEPER AKIM ÖLÇER

- İngilizcesi: wall current monitör
- Demete ters yönde, metalik demet borusunda oluşan akımı okumaya dayalı bir yöntem.

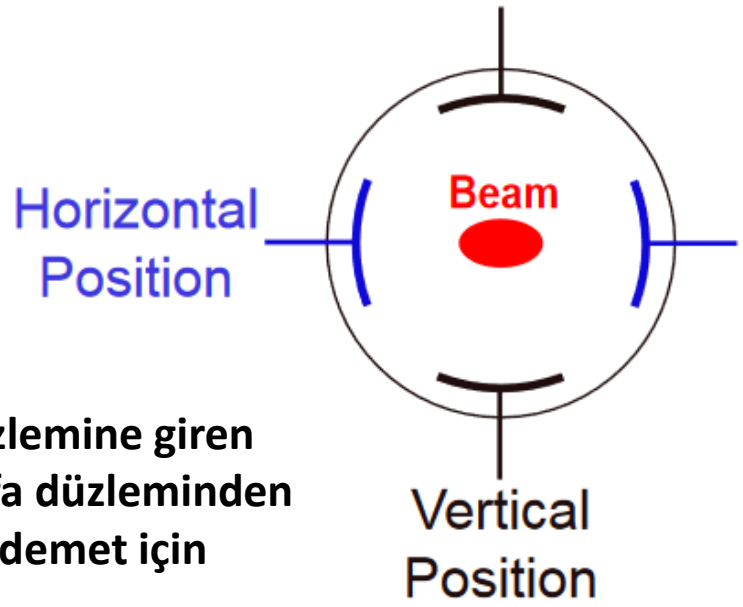


Basitleştirilmiş şekil!

https://uspas.fnal.gov/materials/09UNM/BeamCurrentMonitors.pdf

ENİNE POZİSYON ÖLÇÜMÜ DEMET KONUM ÖLÇER

- İngilizcesi: Beam Position Monitor (BPM)
- Demetin etrafında yarattığı elektrik alanı kullanarak çalışır
  - Yatayda iki antenden sinyal alıp karşılaştırarak yatay demet konumunu ölçer
  - Dikeyde iki antenden sinyal alıp karşılaştırarak dikey demet konumunu ölçer.



Sayfa düzlemine giren veya sayfa düzleminden çıkan bir demet için

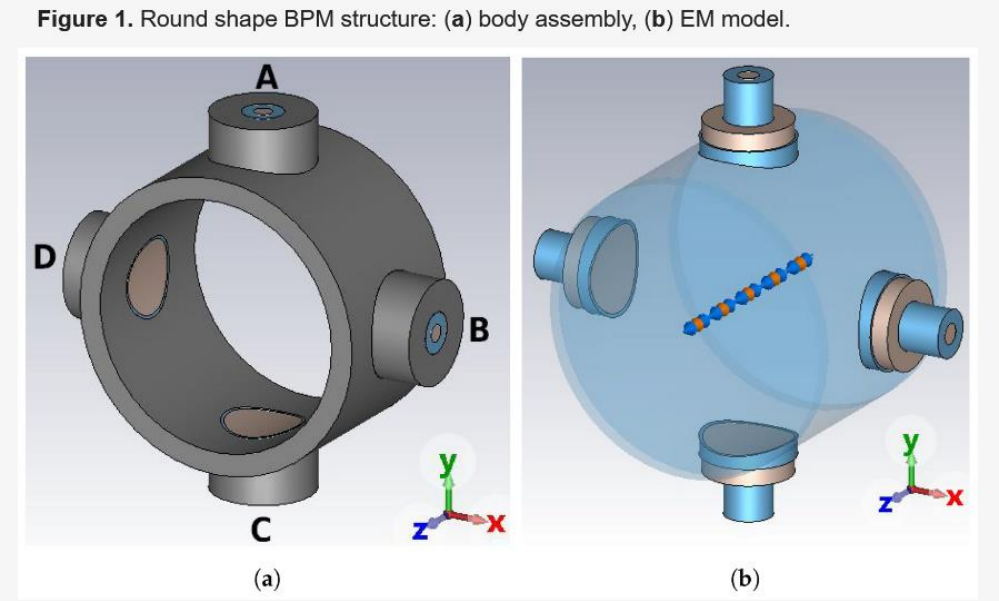
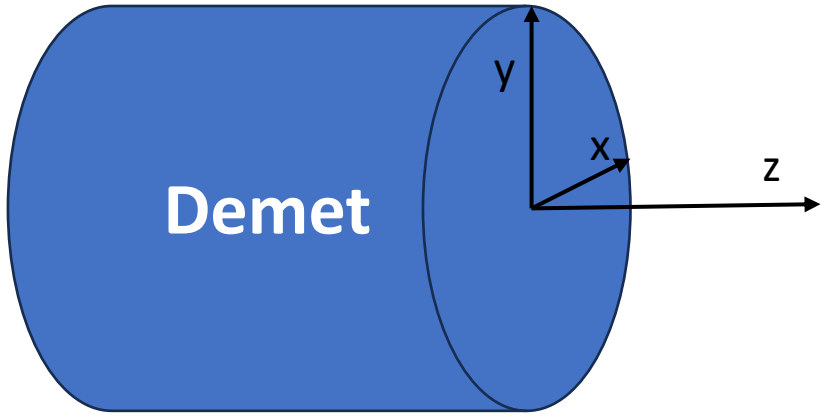


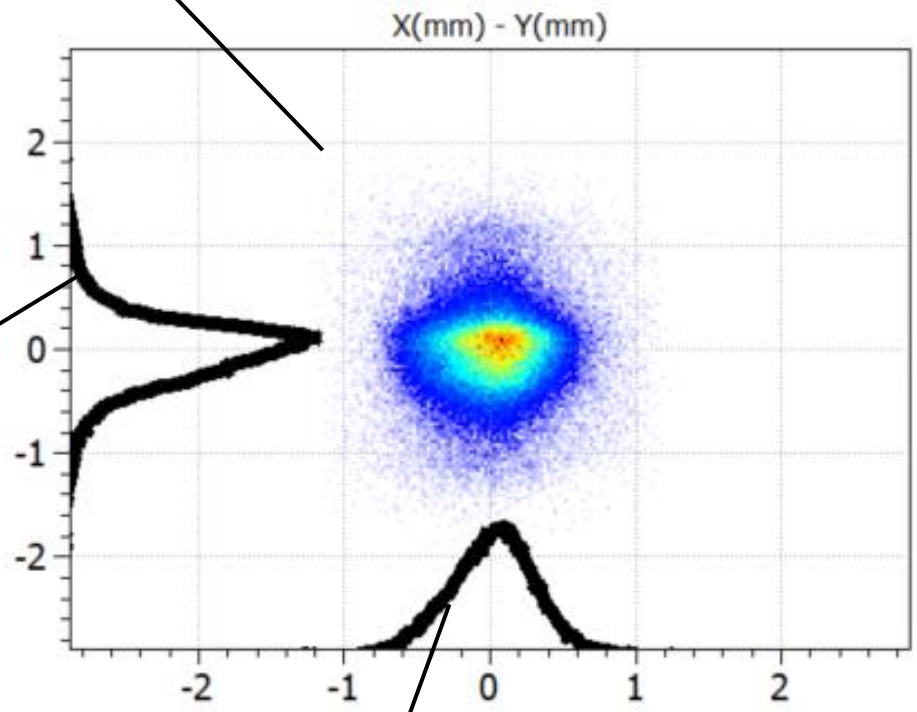
Figure 1. Round shape BPM structure: (**a**) body assembly, (**b**) EM model.

https://www.mdpi.com/1424-8220/24/9/2726

ENİNE DEMET PROFİLİ ÖLÇÜMLERİ

2 boyut: x-y düzleminde parçacık yoğunluğu dağılımı nasıldır?



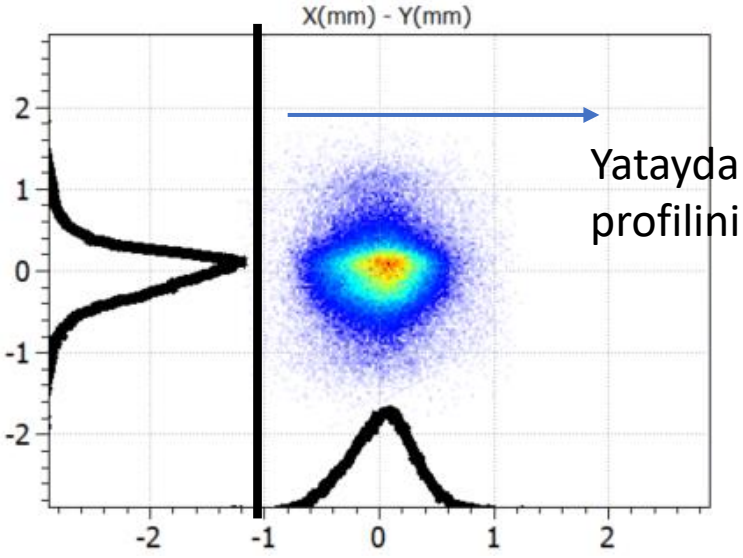


1 boyut: Y yönünde gidildiğinde parçacık yoğunluğu nasıl değişiyor?

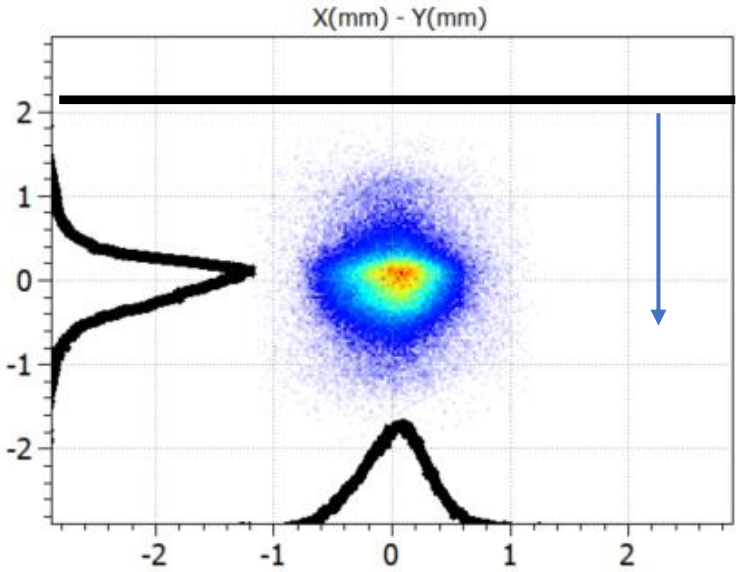
1 boyut: X yönünde gidildiğinde parçacık yoğunluğu nasıl değişiyor?

ENİNE DEMET PROFİLİ ÖLÇÜMLERİ TEL TARAYCI

- İngilizcesi: Wire Scanner
- Bir telin demetin yatayda veya dikeyde hareket ettirilmesi ve tel üzerinde oluşan sinyalin ölçülmesine dayanan ölçüm tekniği.



Yatayda demet profilini verir

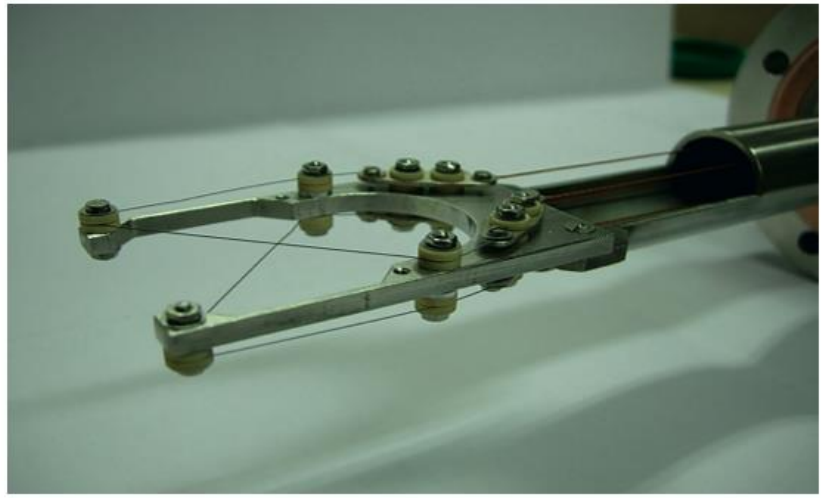


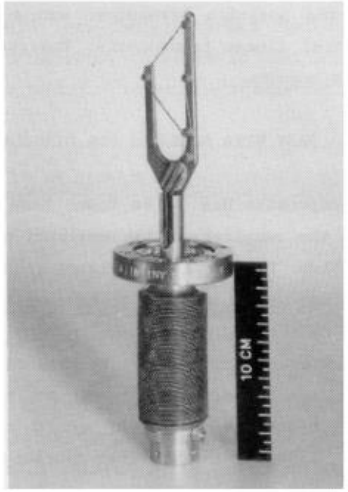
Dikeyde demet profilini verir

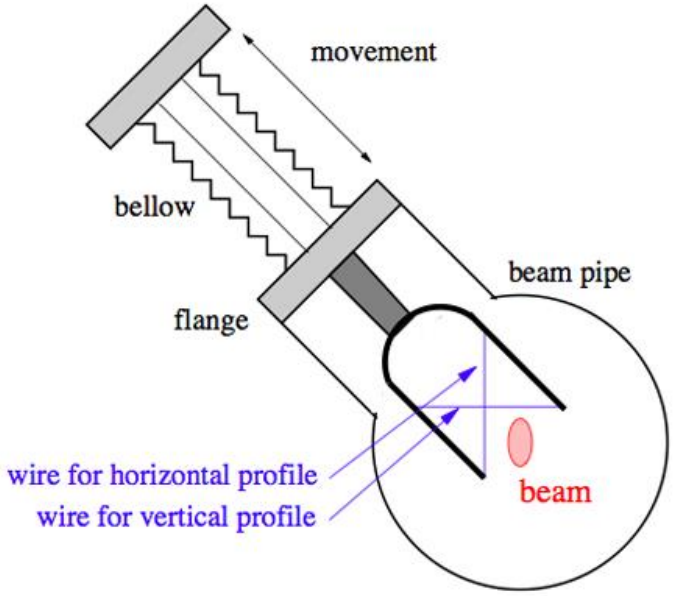
ENİNE DEMET PROFİLİ ÖLÇÜMLERİ
TEL TARAYCI

- Teli hareket ettirmek gerektiği için hızlıca demet profili ölçemez. Demet profili üzerindeki her sinyal farklı makro-atma veya mikro-atmadan gelir.
- Bir kol üzerine iki tel gerilerek aynı anda hem yatay hem dikey demet profili ölçülebilir.
- İki kanallı bir okuma devresi yeterli!

Tel tarayıcı örnekleri

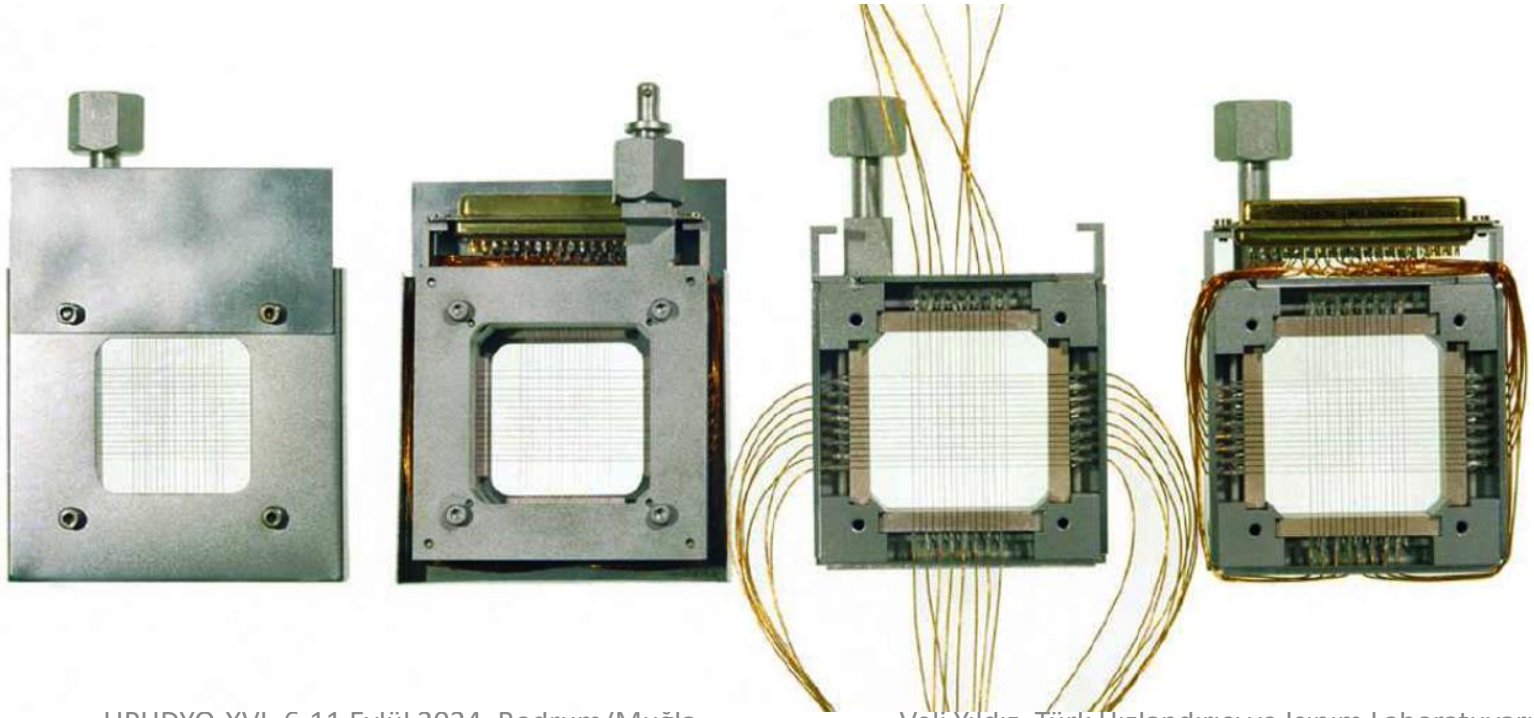


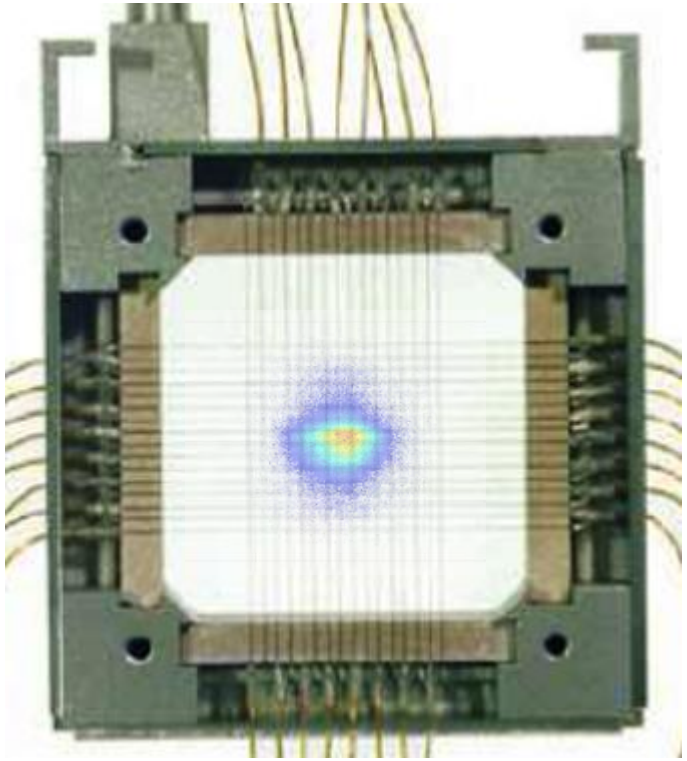




ENİNE DEMET PROFİLİ ÖLÇÜMLERİ
SEM IZGARASI

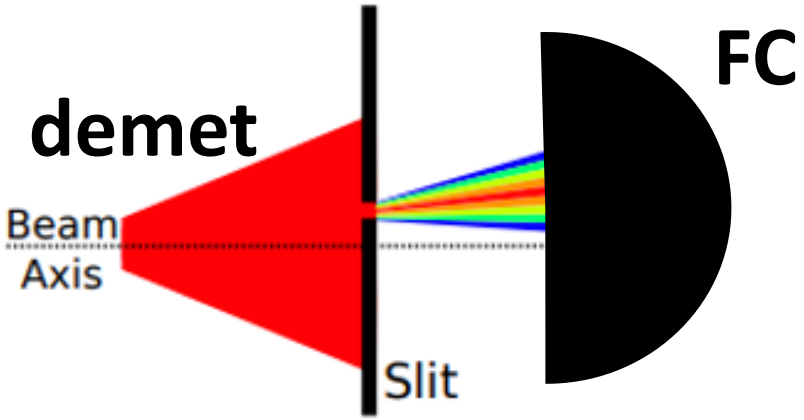
- İngilizcesi: SEM Grid (secondary electron emission grid)
- Birçok telden oluşur.
- Izgaradan geçen parçacıkların ızgara tellerinde oluşturduğu sinyali ölçmeye dayanır.
- Aynı anda tek bir atmanın hem yatayda hem dikeyde profilini ölçebilir.
- Her tel için ayrı okuma devresi gereklidir!

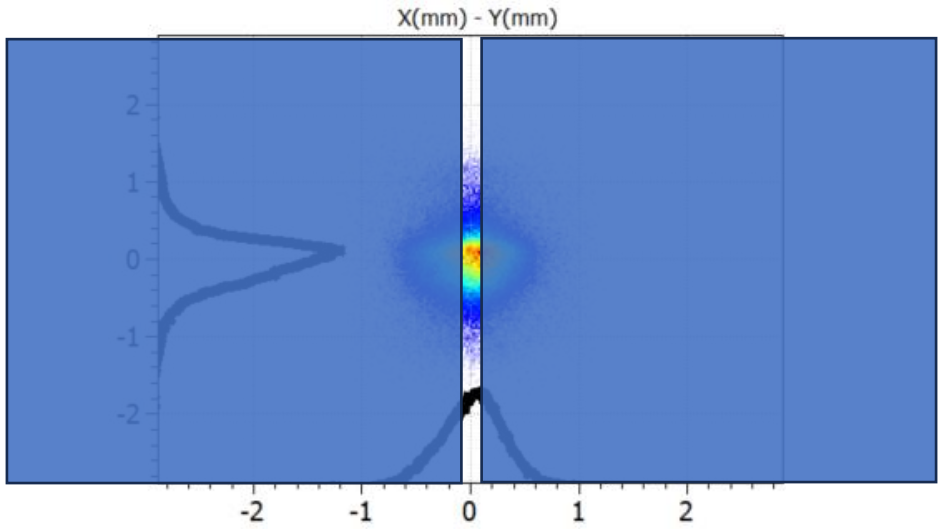




ENİNE DEMET PROFİLİ ÖLÇÜMLERİ YARIK + FARADAY KABI

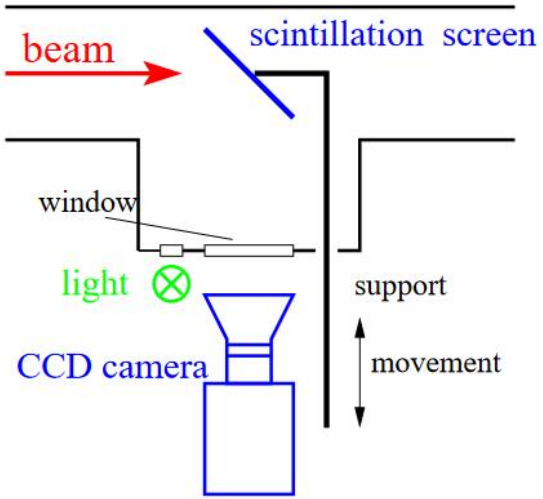
- Bir tel tarayıcının yaptığı işlevi bir yarık (İngilizcesi: slit) ve bir Faraday Kabına yaptırabilirsiniz.
- Yarık ile belirli konumda parçacıklar seçilir, arkasına konulmuş bir FC ile bu konumdaki parçacık akımı ölçülür.
- Yarık hareket ettirilir ve böylece her konumdaki parçacık akımı ölçülüp demet profili çıkartılır.

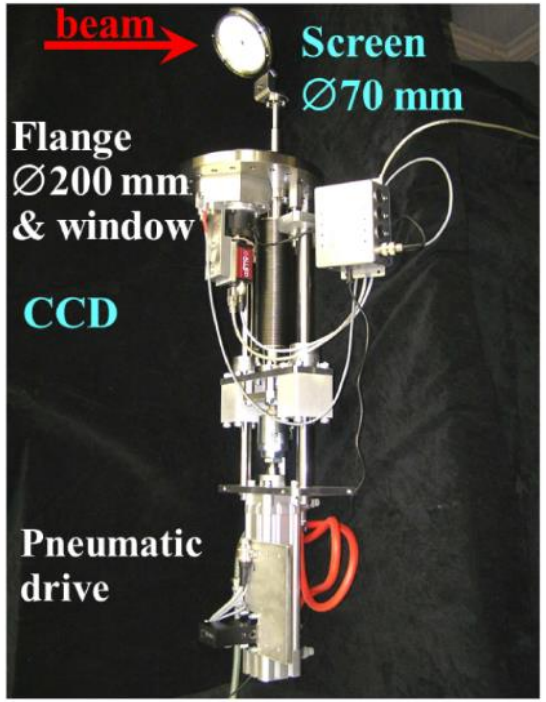


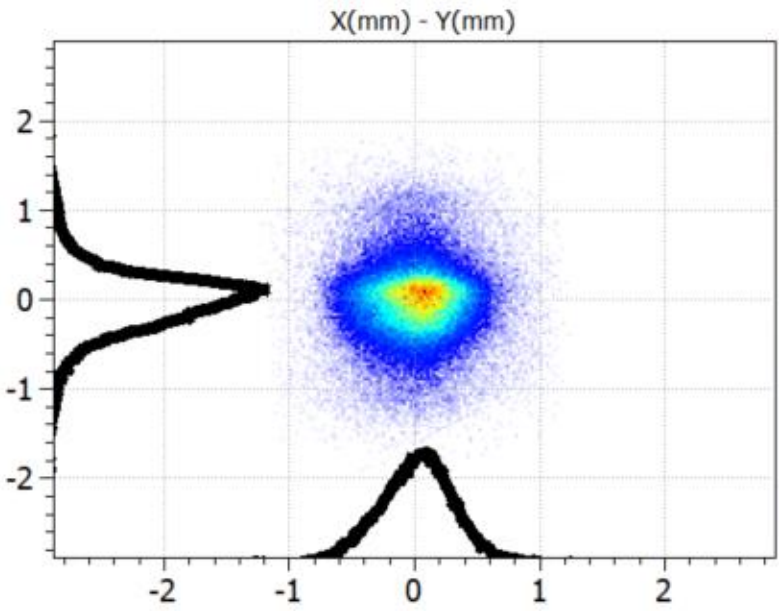


ENİNE DEMET PROFİLİ ÖLÇÜMLERİ SİNTİLATÖR VE KAMERA

- Demet önüne konulmuş sintilatör üzerine parçacılar çarptığında sintilatör ışık yayar ve çıkan ışık kamera yardımı ile ölçülür. Böylece demetin 2 boyutlu profili ölçülmüş olur.



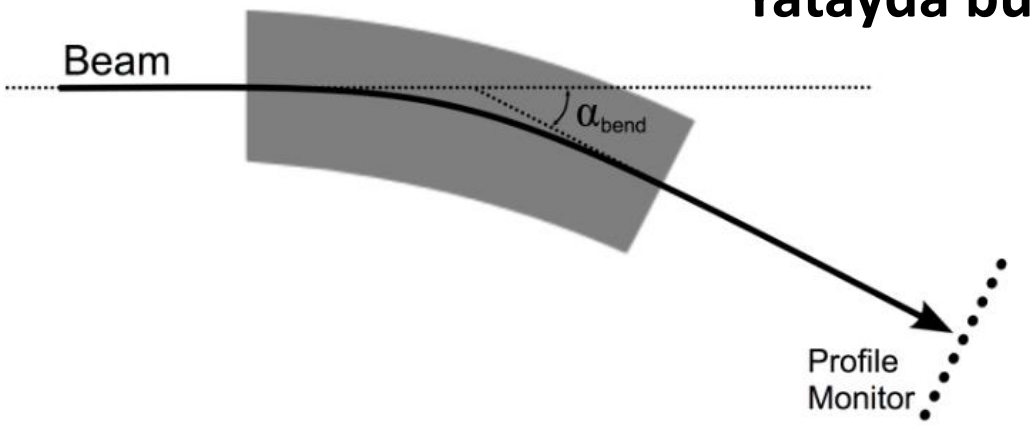




DEMET ENERJİSİ ÖLÇÜMÜ MANYETİK SPEKTROMETRE

- Özellikleri (fiziksel ve manyetik özellikleri) iyi bilinen bir iki kutuplu mıknatıs ile demet saptırılarak sapma açısı, demet yükü ve demeti etkileyen manyetik alanın integrali kullanılarak demetin momentumu hesaplanabilir.
- Momentum dan enerji hesaplanabilir.
- Hem rölativistik hem de rölativisttik olmayan demetler için kullanılabilir.

Yatayda bükülen bir demet için

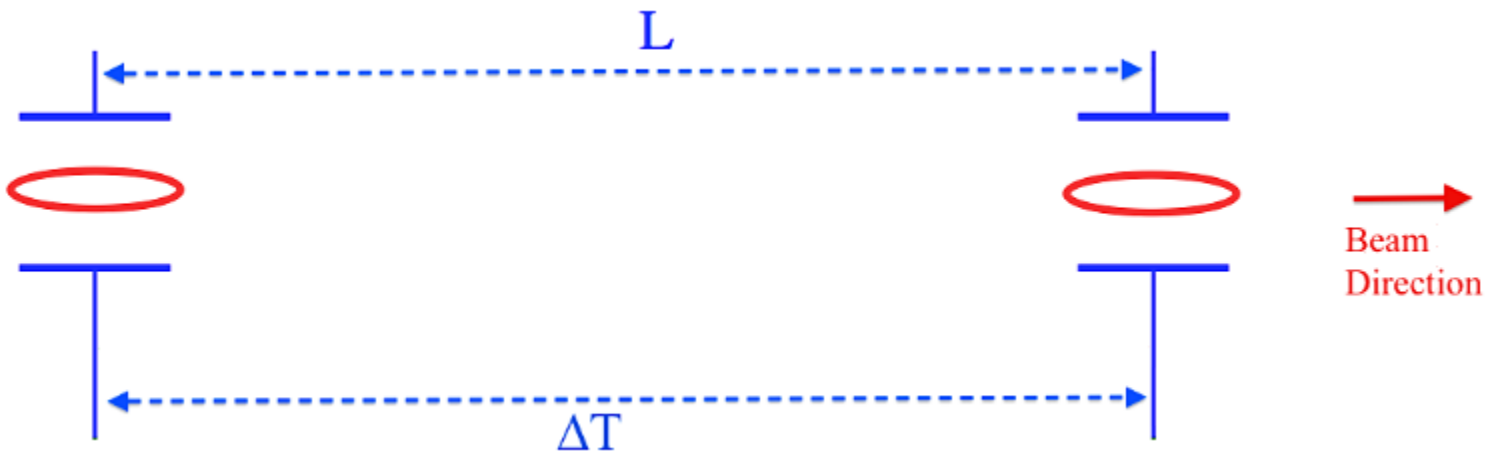


$$p = \frac{q}{\alpha_{bend}} \int_{path} B_y(z)dz$$

DEMET ENERJİSİ ÖLÇÜMÜ
UÇUŞ ZAMANI

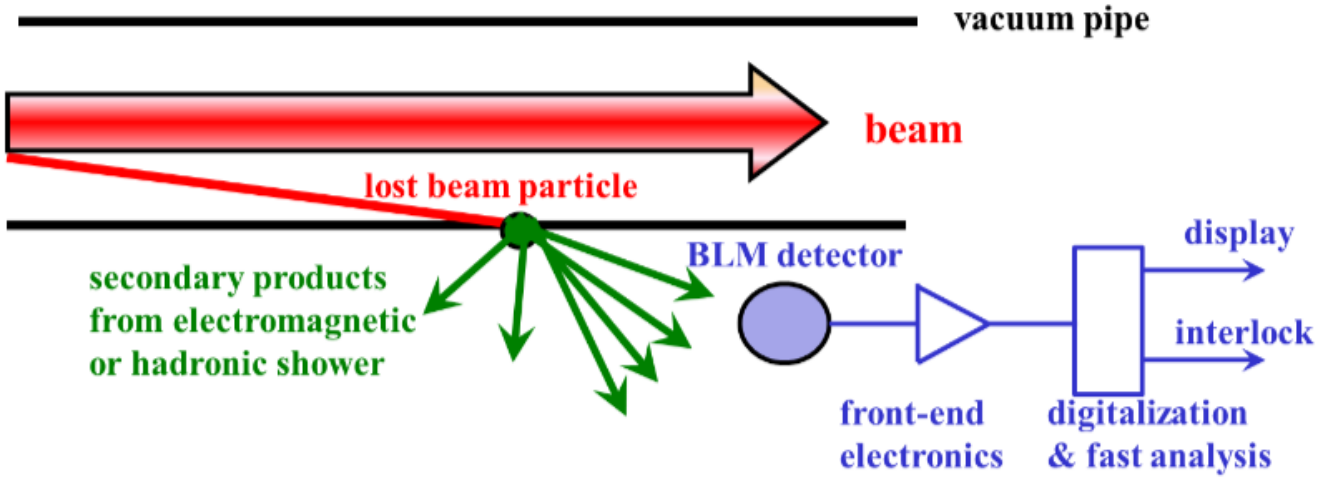
- İngilizcesi: Time of Flight
- İki nokta arasını bir mikro-atmanın ne kadar zamanda geçtiğini ölçmeye dayanan yöntemdir.
- Zaman ve yoldan hız, hızdan da enerji hesaplanabilir.
- Sadece rölativisttik olmayan demetler için kullanılabilir.
- Rölativisttik demetler için kullanılmaz. **Neden acaba?**

Basitleştirilmiş şekil!



DEMET KAYIP ÖLÇÜMLERİ

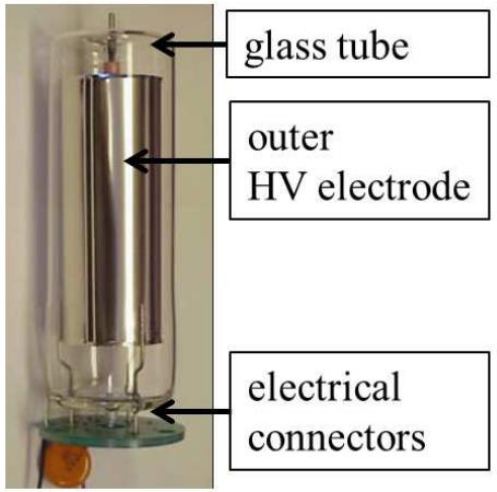
- Herhangi bir sebepten dolayı demet borusuna çarpan parçacıklar ikincil parçacıklar veya foton yaratırlar.
- Hızlandırıcı hattı boyunca konulmuş demet kayıp monitörleri bu ikincil parçacıkları veya fotonları ölçerek bize demet kayıplarının nerede olduğunu gösterebilir.
- Demet kayıp ölçümü makine koruma sisteminin önemli bir parçasıdır.

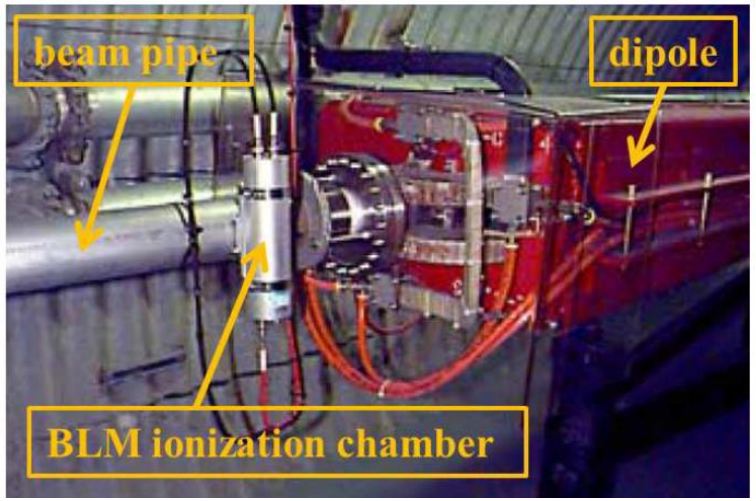


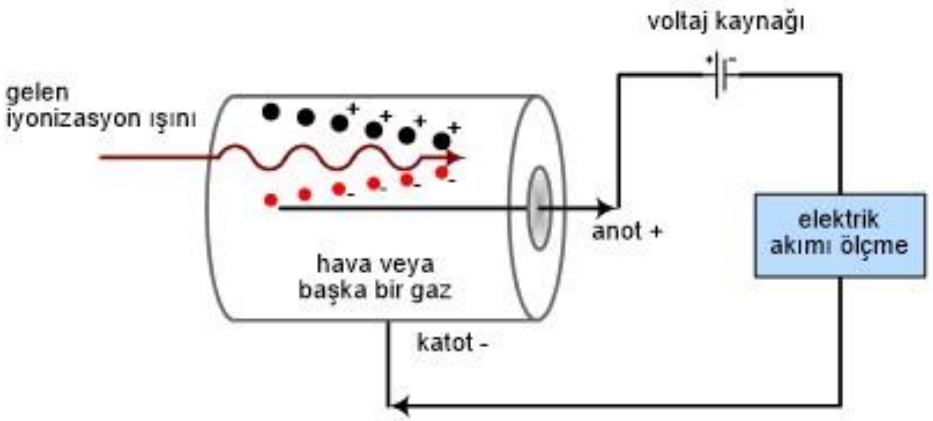
DEMET KAYIP ÖLÇÜMLERİ

İYON ODASI

- Demet kayıp ölçümleri için monitörler çeşitlilik gösterir.
- Bir örneği iyon odalarıdır.
- İkincil parçacıkların bir gaz içerisinden geçerken oluşturduğu iyonların yarattığı elektrik akımını ölçmeye dayalı bir yöntemdir.



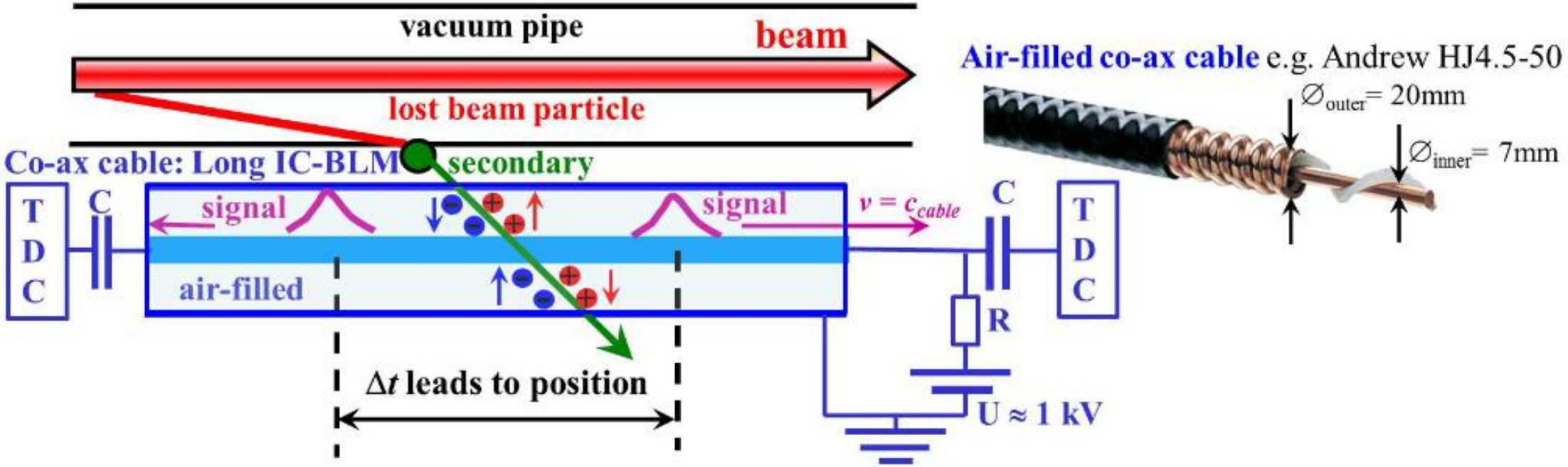




http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_965.html

DEMET KAYIP ÖLÇÜMLERİ
İYON ODASI

Pratik iyon odaları (RF kablosu) demet hattı boyunca konulabilir



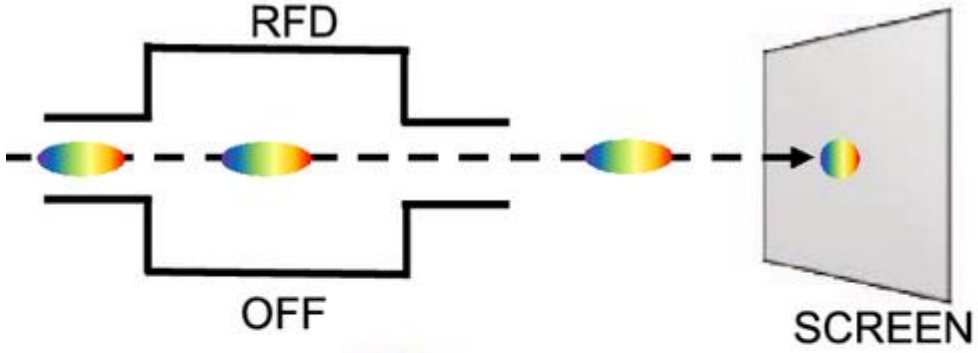
Biraz daha karmaşık demet parametrelerinin ölçümüne örnekler

Boyuna demet profili
Enerji dağılımı
Enine emittance

BOYUNA DEMET PROFİLİ ÖLÇÜMÜ

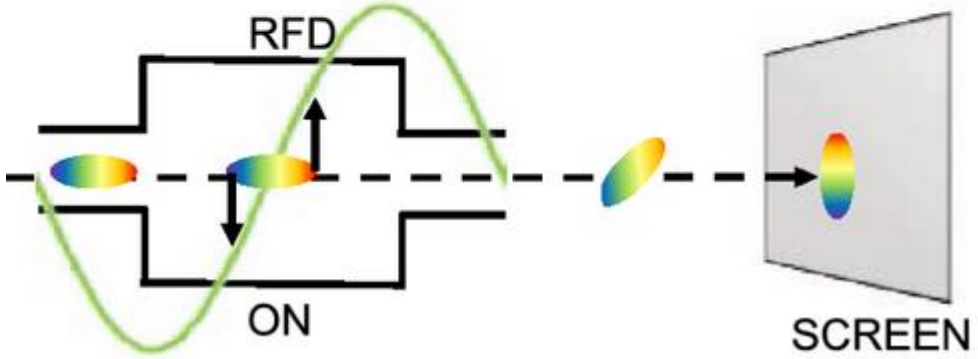
- Mikro-atma boyunca demetin yoğunluğunu ölçmektir.
- Birkaç yöntem vardır. Bunlardan biri enine yönde elektrik alan salınımı yaptıran bir RF kovuğundan demeti geçirerek boyuna demet dağılımını enine demet dağılımına dönüştürmektir. (elektronlar için kullanılır)

RF kovuğu kapalı



Dikey demet profili ve boyuna demet profili arasında bir korelasyon yok.

RF kovuğu açık

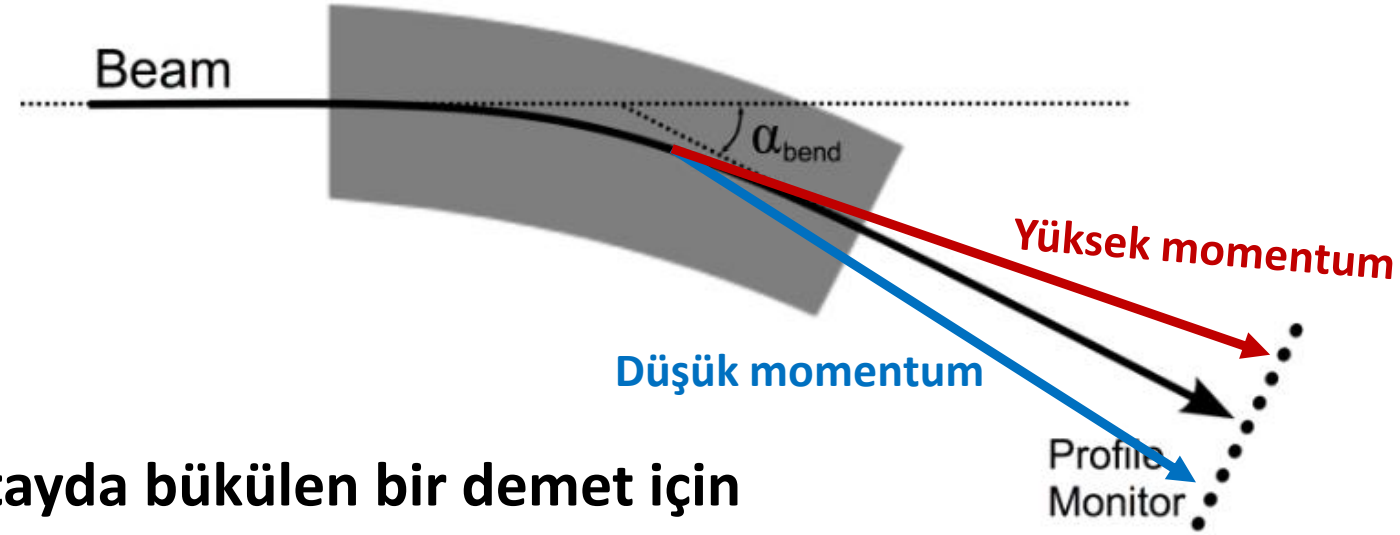


Dikey demet profili ve boyuna demet profili arasında bir korelasyon var.

https://www.nature.com/articles/s41598-020-67997-1

ENERJİ DAĞILIMI
MANYETİK SPEKTROMETRE

- Manyetik spektrometreden geçen parçacıkların dönme açıları momentumlarına bağlıdır. Momentumu yüksek olanın sapma açısı küçüktür, momentumu düşük olanın sapma açısı büyüktür.
- Spektrometre yardımı ile momentum dağılımı enine demet dağılımına görüştürülür.
- Spektrometreden sonra enine demet profili ölçülerek momentum dağılımı ve enerji dağılımı hesaplanabilir.

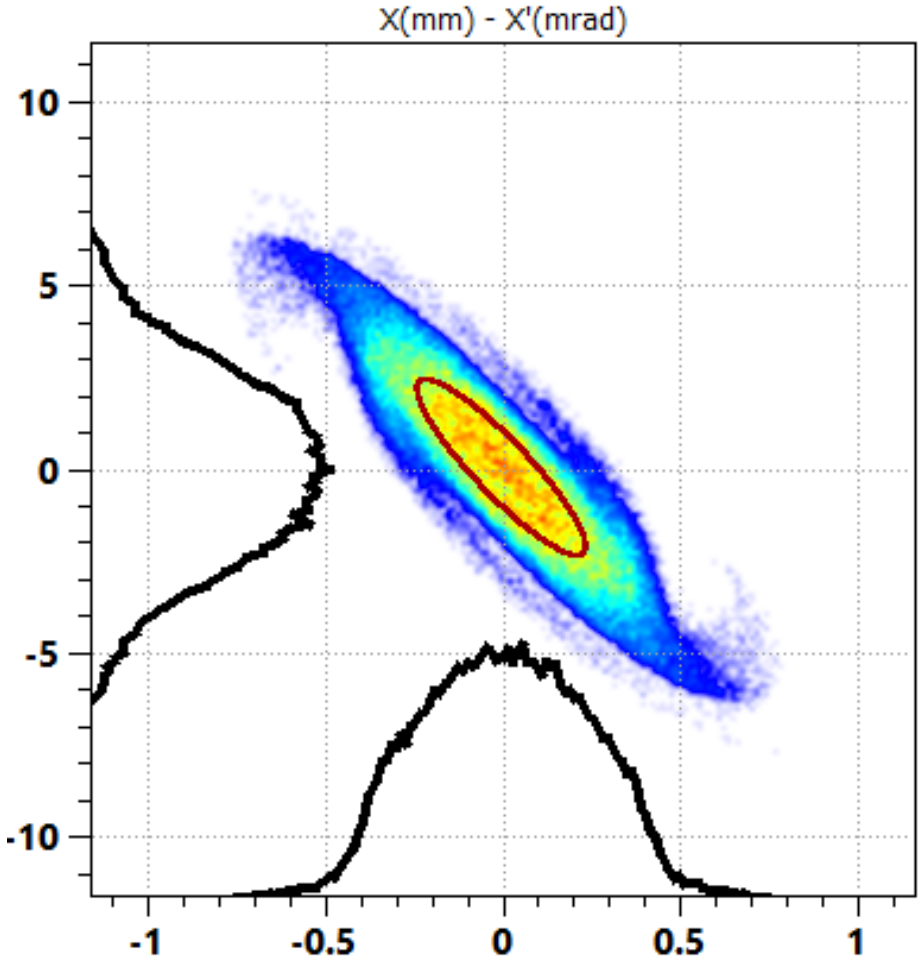


Yatayda bükülen bir demet için

$$x_{rms} \approx D \frac{p_{rms}}{p_0}$$

D: Dispersiyon parametresidir. Mıknatısa ve mıknatısla profil ölçer arasındaki uzaklığa bağlıdır.

ENİNE EMITTANCE ÖLÇÜMÜ

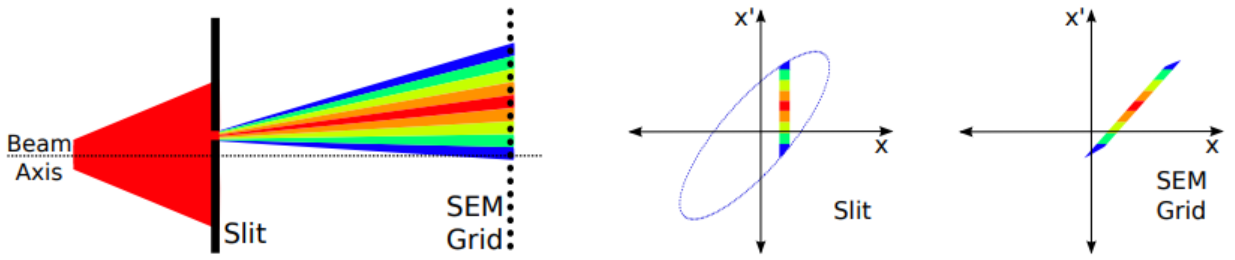


Doğrudan emittance ölçümü: Faz uzayındaki parçacık yoğunluğunu örnekleyerek faz uzayını oluşturma. Düşük enerjili demetler için kullanılır.

Dolaylı emittance ölçümü: değişik optik koşulları yaratarak demet profili ölçme ve demet profilinden rms emittance elipsinin parametrelerini hesaplama. Yüksek enerjili demetler için kullanılır.

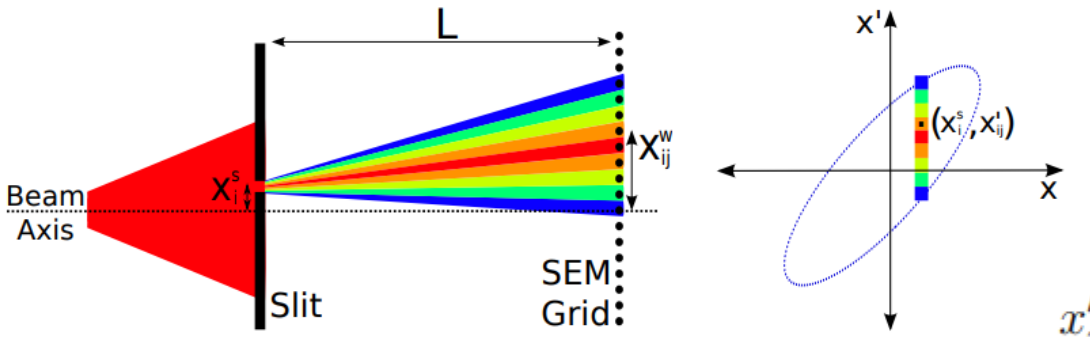
ENİNE EMITTANCE ÖLÇÜMÜ DOĞRUDAN ÖLÇÜM

Örnek: Tek Yarık + Profil ölçer (SEM ızgarası)



(a) (b)

The motion of the selected particles from the slit to the grid, (a) in real space, (b) in a phase space.



(a) (b)

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij}^w - x_i^s}{L}$$

Reconstructing the phase space from the measurement data.

- Yarık ile faz uzayında benzer konuma sahip olan parçacıklar seçilir (parçacık hüzmesi).
- Bu parçacıklar yarıktan profil ölçere doğru yol alırken divergence farkından dolayı açılırlar ve profil ölçerde bir pozisyon dağılımı meydana gelir.
- Yarığın konumu ve ekrandaki profil kullanılarak divergence dağılımı hesaplanır.

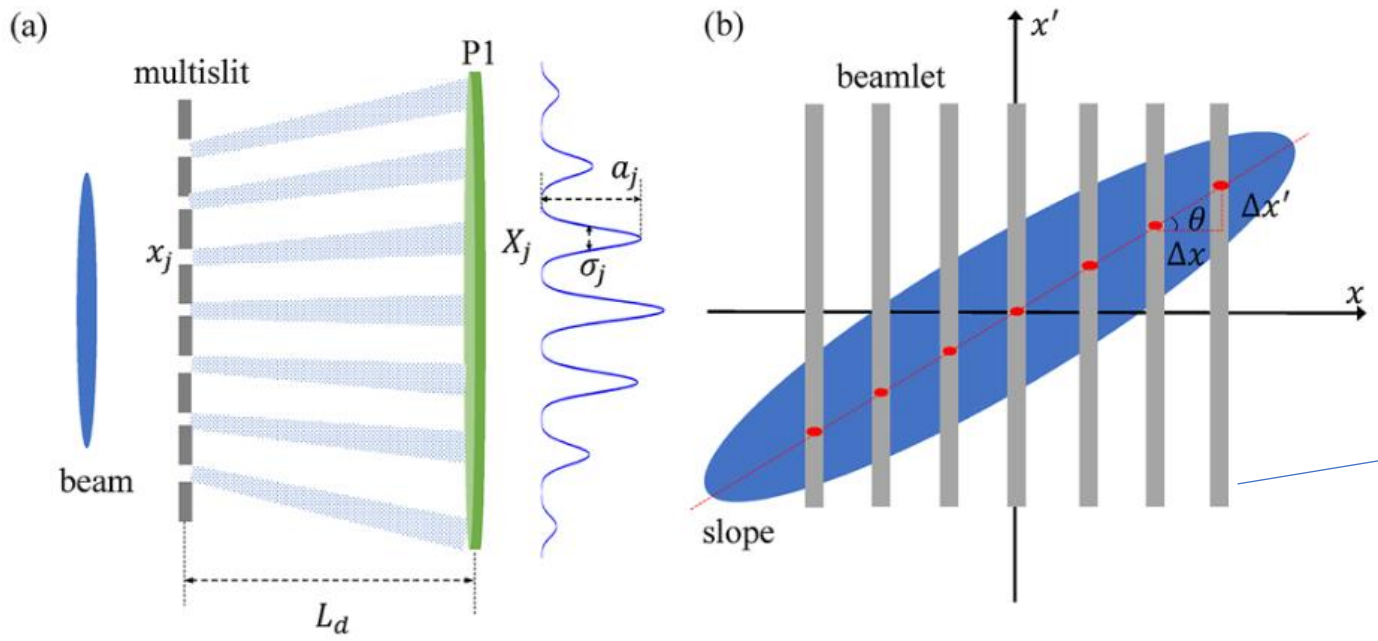
- Yukarıdaki işlem farklı yarık konumları için tekrarlanarak demetin faz uzayı örneklenir.

ENİNE EMITTANCE ÖLÇÜMÜ DOĞRUDAN ÖLÇÜM

Örnek: Çoklu Yarık + Profil ölçer (sintilatör ekran)

Bir yerine birden çok yarık kullanılırsa faz uzayı çok hızlı örneklenebilir.

Gerçek uzay **Faz uzayı**

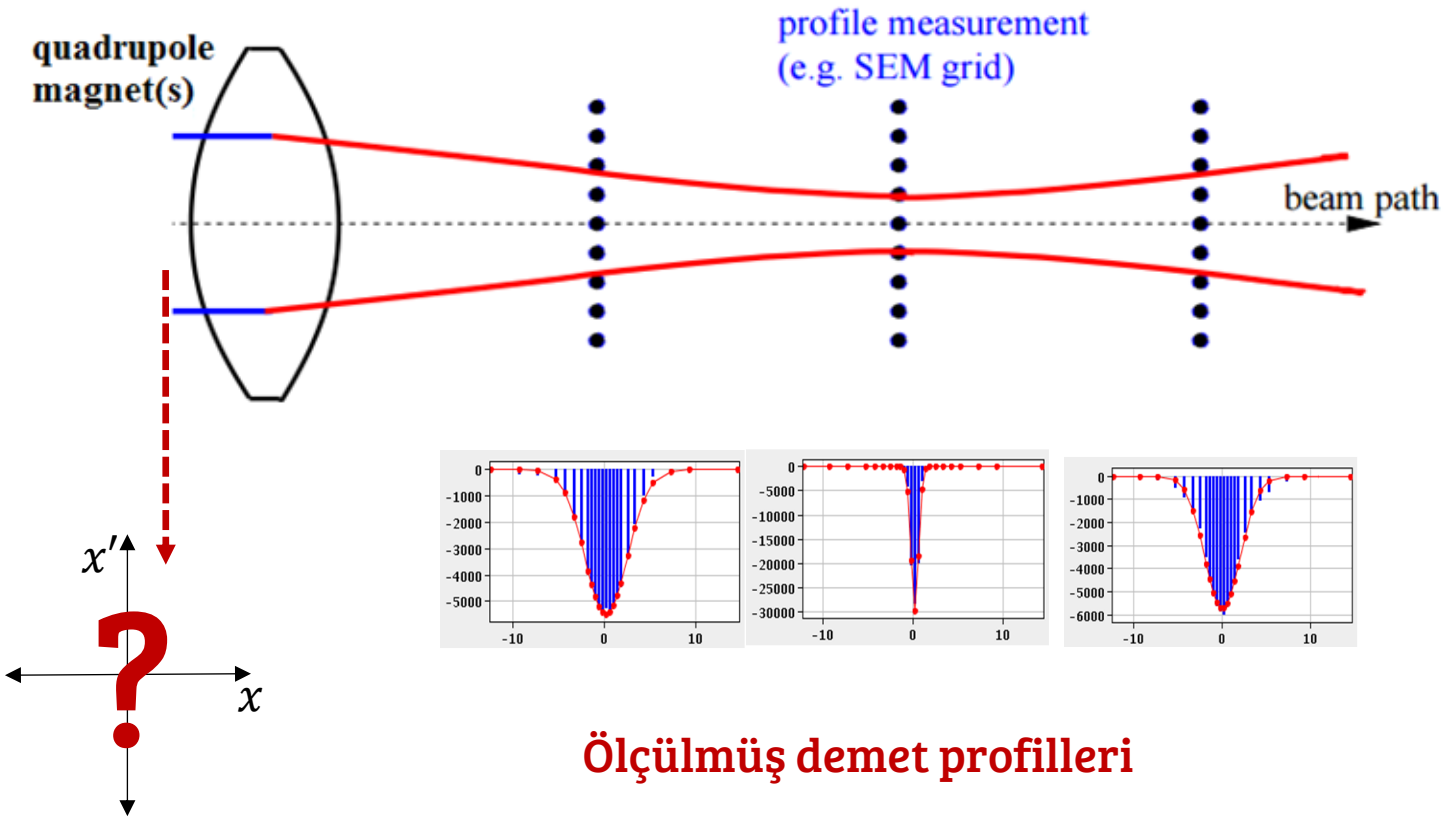


Faz uzayında örneklenen bölgeler

https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.19.020706

ENİNE EMITTANCE ÖLÇÜMÜ DOLAYLI ÖLÇÜM

3 monitör yöntemi

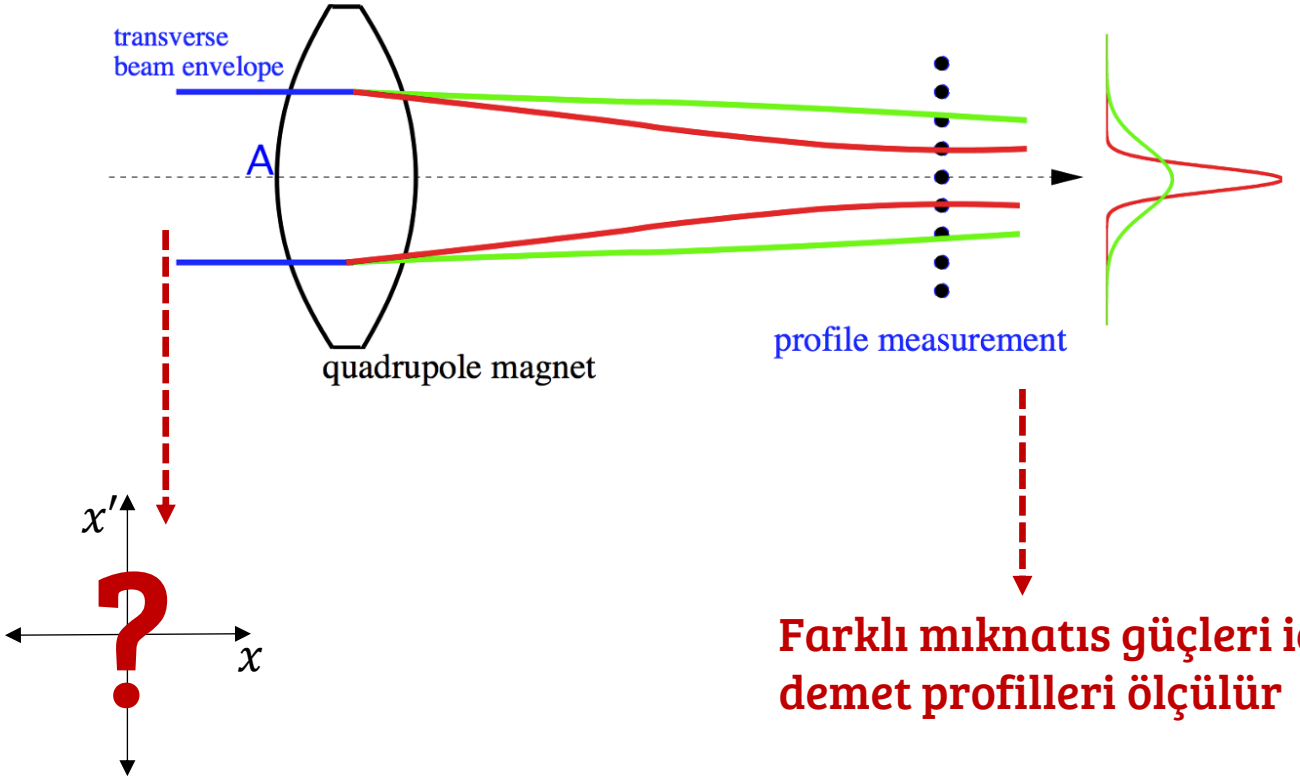


Ölçülmüş demet profilleri

- Bir (veya daha çok) dört kutuplu mıknatıstan sonra demet odaklanır ve en az 3 farklı noktada ölçülür.
- Ölçülen demet profiller ve transfer matrisi bilgisi kullanılarak rms emittance elipsinin parametreleri hesaplanır.

ENİNE EMITTANCE ÖLÇÜMÜ DOLAYLI ÖLÇÜM

Dört kutuplu tarama yöntemi

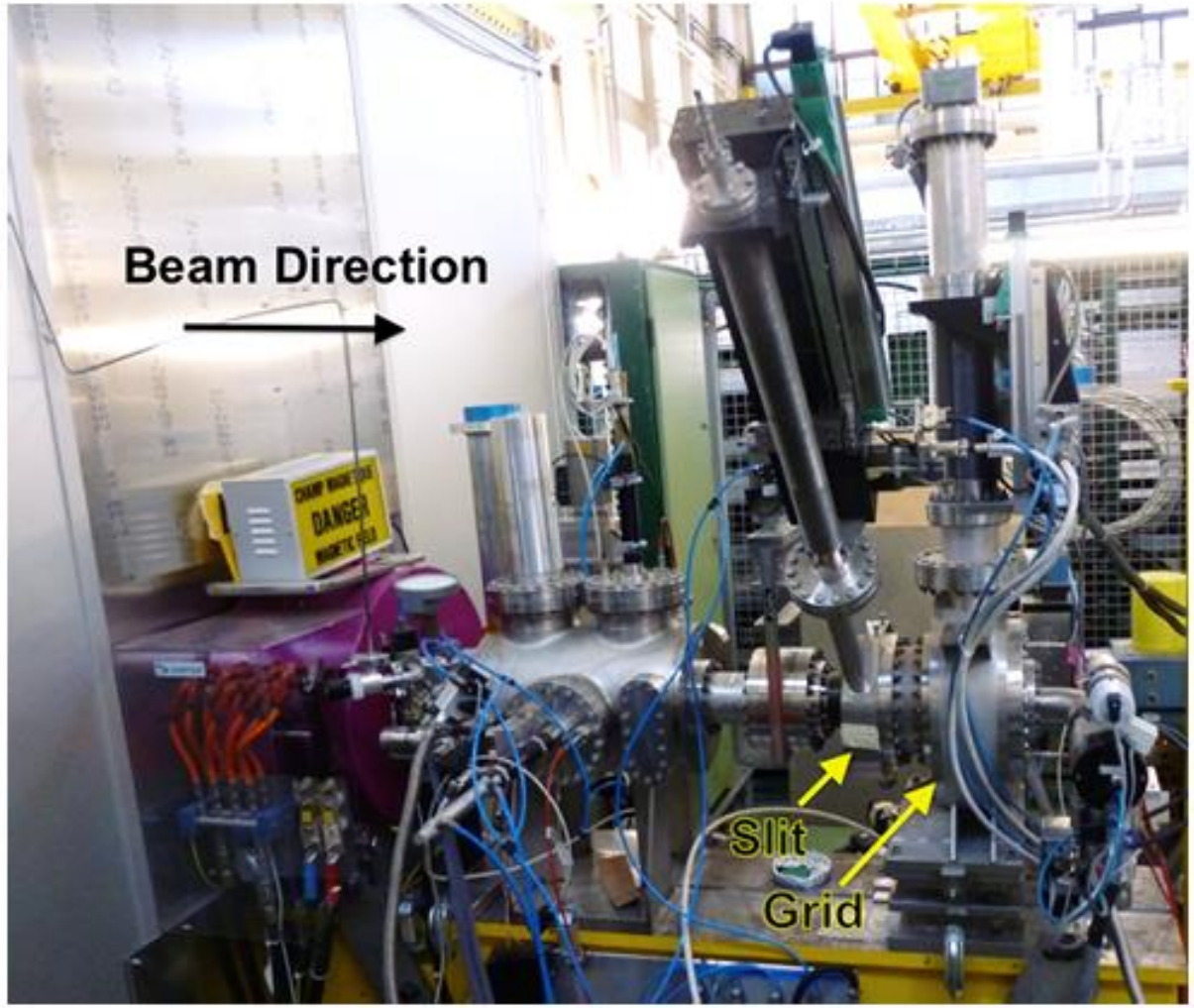


Farklı mıknatıs güçleri için demet profilleri ölçülür

- Bir (veya daha çok) dört kutuplu mıknatıstan sonra bir profil ölçer konulur.
- Dört kutuplu mıknatısın gücü taranarak farklı optik koşullarda demet profilleri ölçülür. En az üç profil gerekir.
  - Dağılan demet, profil ölçerde odaklanmış demet, profil ölçer öncesinde odaklanmış demet.
- Her ölçüm koşulu için transfer matrisi ve ölçülen demet profili kullanılarak dört kutuplulardan önce rms emittance parametreleri hesaplanır.

Bazı Hızlandırıcılardan örnekler

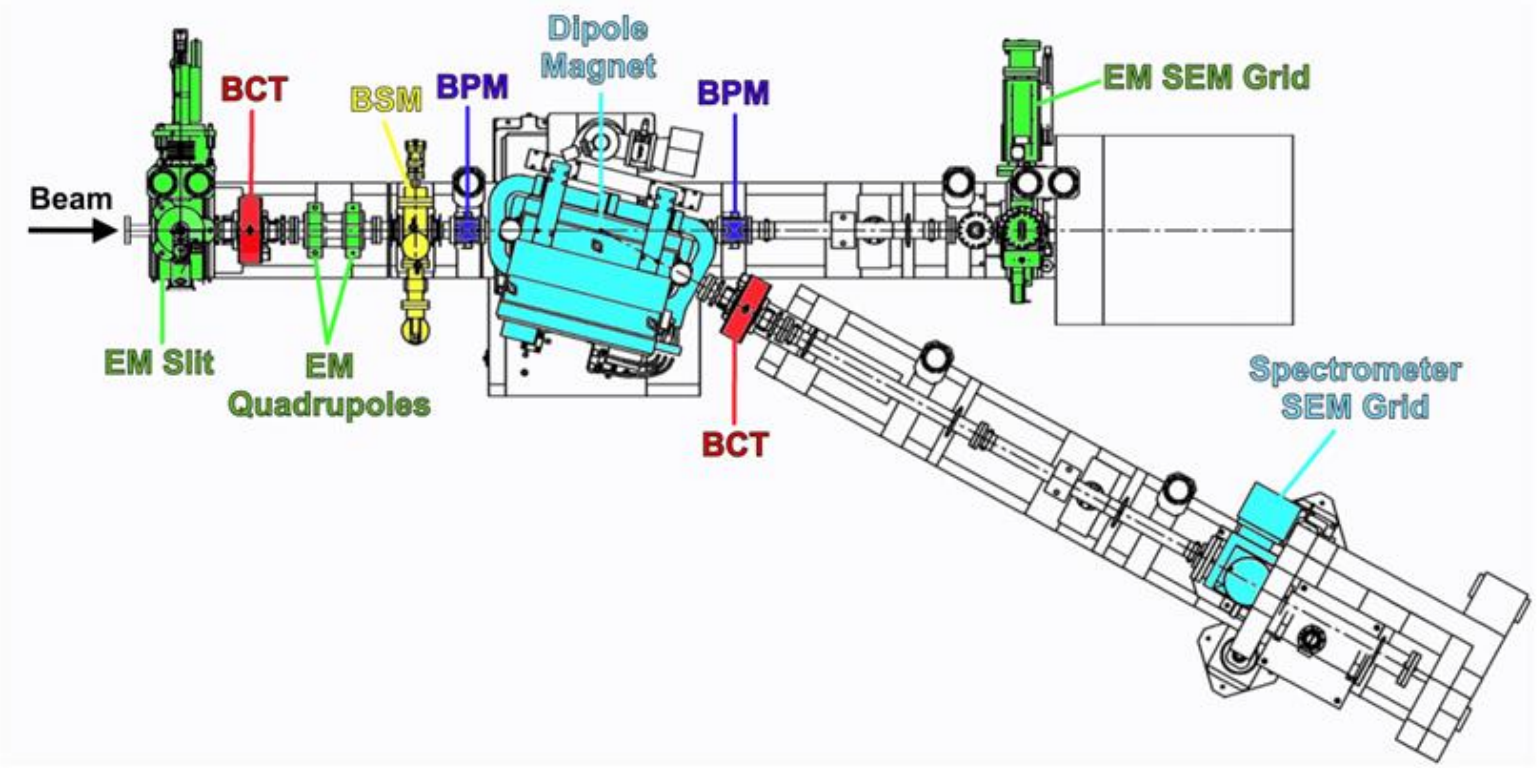
CERN, LINAC4 İYON KAYNAĞI SONRASI



CERN de Linac4 devreye alınırken kullanılan <u>doğrudan emittance ölçümü aleti:</u> yarık + SEM Izgarası.

45 keV lik protonlar ve H- iyonları için kullanıldı.

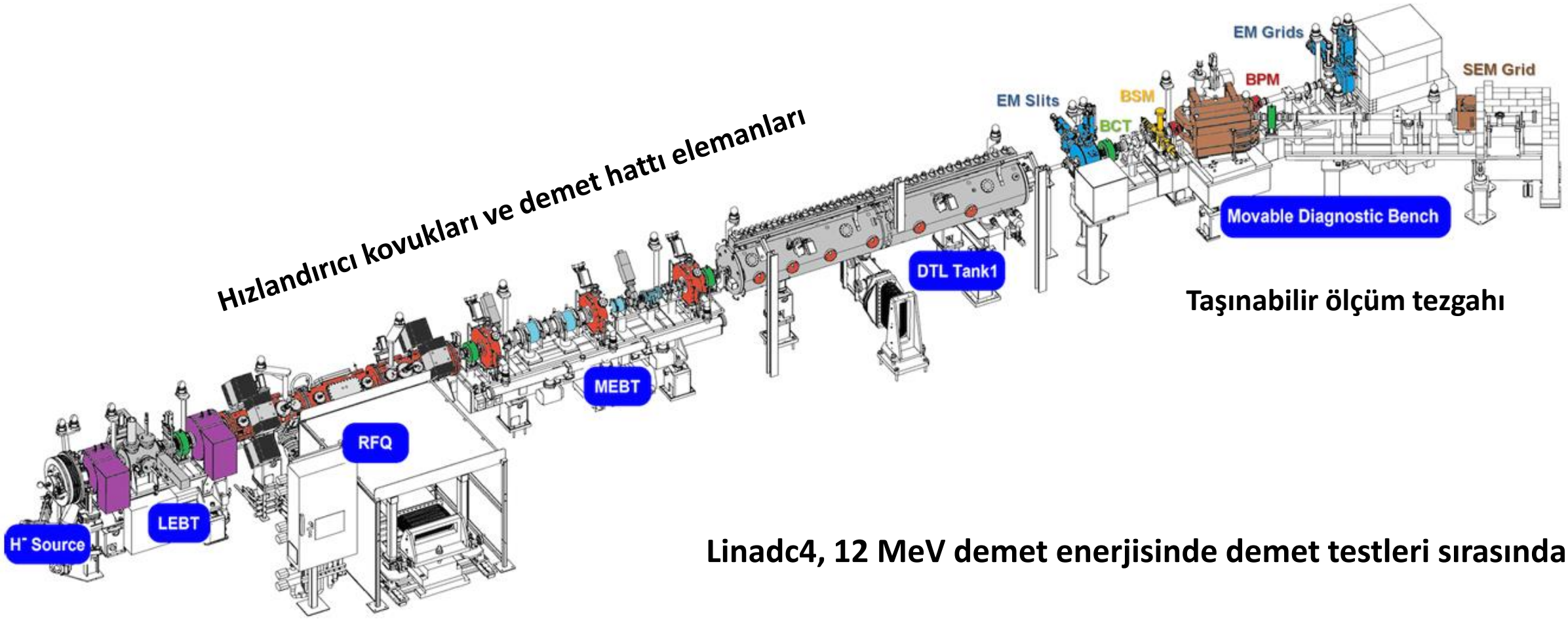
CERN, Linac4 3 - 12 MeV ARASI TAŞINABİLİR ÖLÇÜM TEZGAHI



Demet akımı: akım transformatörleri
Demet profili : SEM ızgaraları
Emittance: Yarık + SEM ızgarası
Enine pozisyon: konum ölçerler (BPM)
Enerji: spektrometre
Enerji: BPM ler arası uçuş zamanı
Enerji dağılımı: spektrometre

Hızlandırıcı kovukları sonuna eklenip çıkartılabilen ölçüm tezgahı.
Hızlandırıcıyı devreye alırken kullanıldı.

CERN, Linac4, 12 MeV DE DEMET TESTLERİ



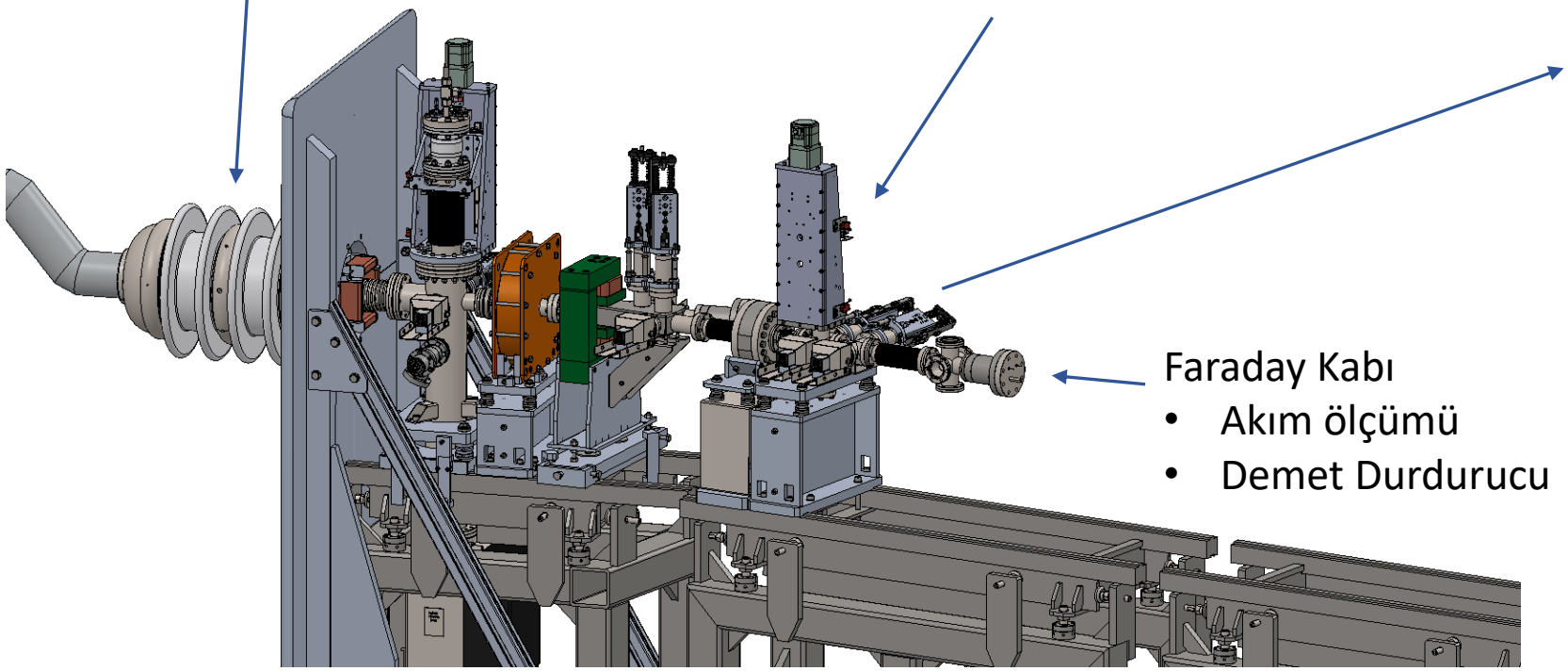
Taşınabilir ölçüm tezgahı

Linadc4, 12 MeV demet enerjisinde demet testleri sırasında

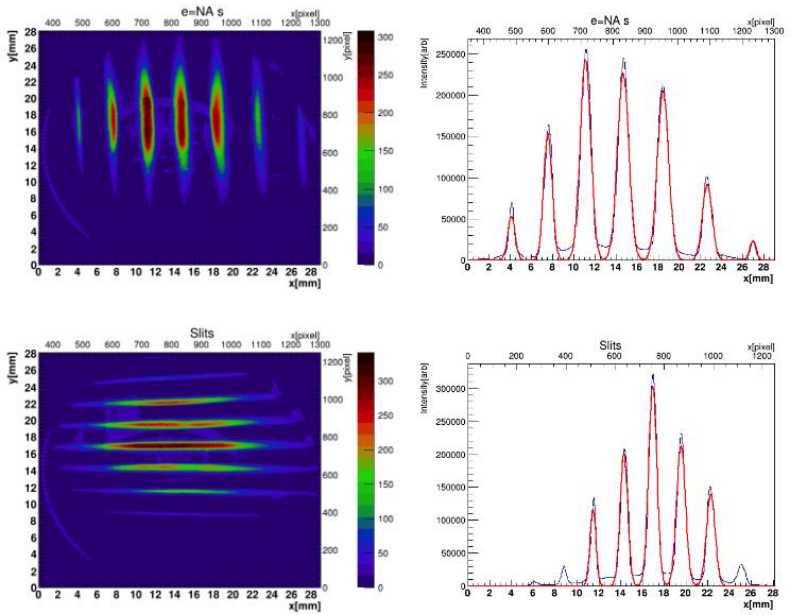
TARLA ELEKTRON TABANCASI SONRASI DEMET ÖLÇÜMLERİ (

Elektron tabancası

Emittance ölçümleri için
Çoklu yarık ve sintilatör ekran

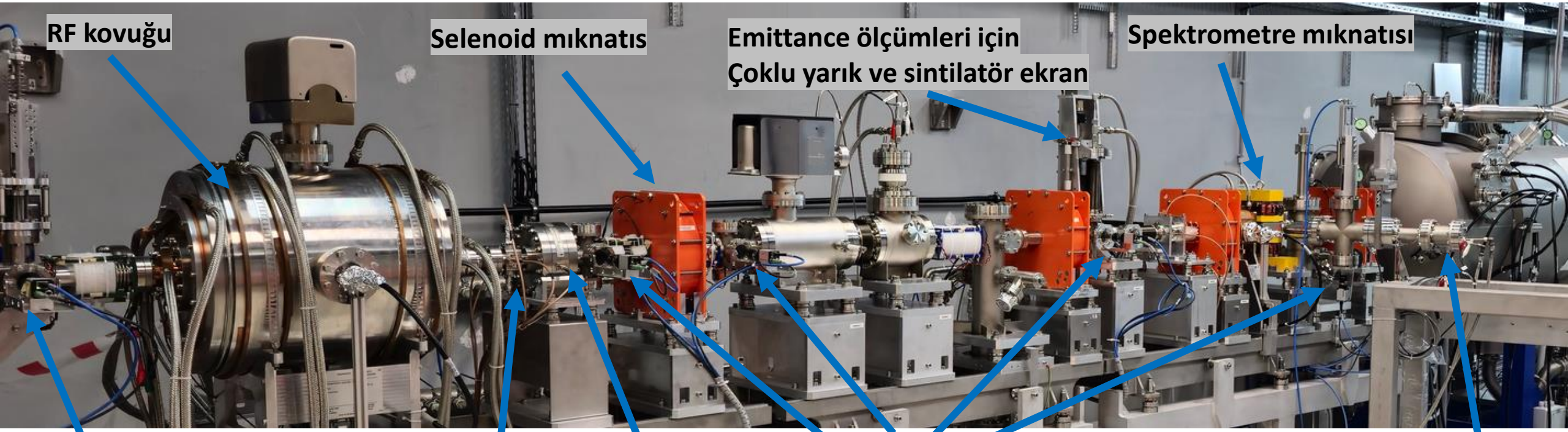


Faraday Kabı
- Akım ölçümü
- Demet Durdurucu

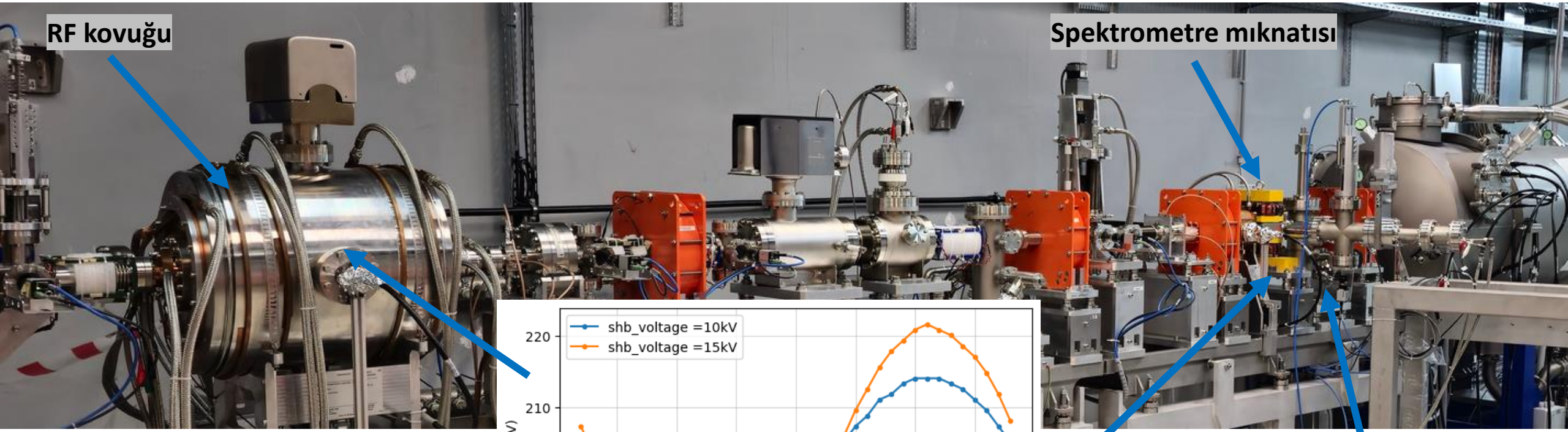


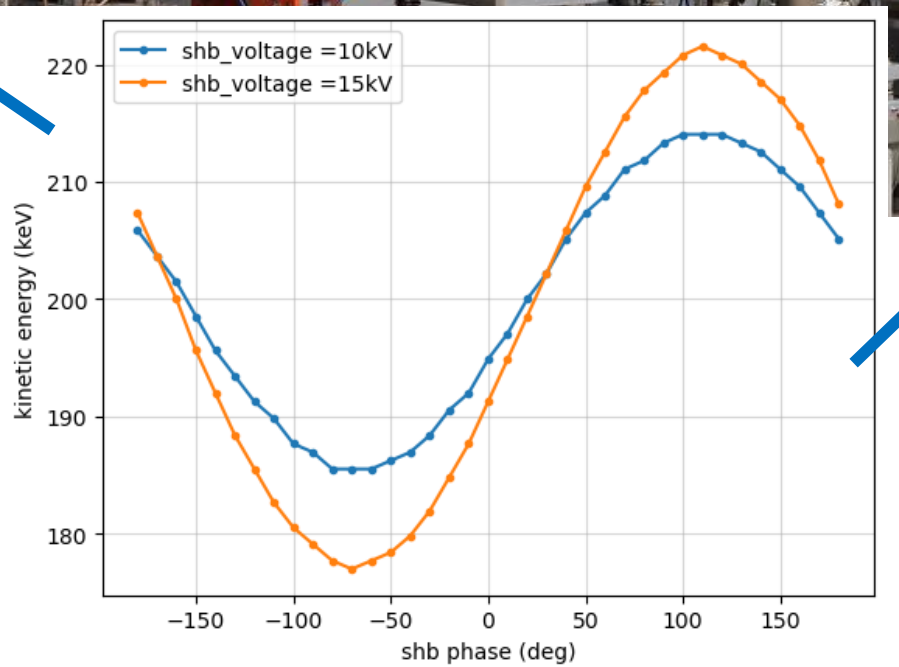
Emittance ölçümleri sırasında sintilatör ekranlardan alınan görüntüler

TARLA ENJEKTÖR HATTI



TARLA ENJEKTÖRÜNCE ENERJİ ÖLÇÜMÜ İLE RF KOVUĞU PARAMETRE OPTİMİZASYONU





2 farklı voltaj seviyesinde kovuk faz taraması

Sintilatör ekran ve Kamera

ÖZET

Demet ölçüm aletlerine ve tekniklerine bir giriş yaptık.

Hangi demet parametreleri nasıl aletlerle veya hangi tekniklerle ölçülür gördük.

Linac-4 ve TARLA hızlandırıcılarından ölçüm tezgahı ve demet hattı ölçüm aletlerine örnekler gördük.

REFERANSLAR

Lecture Notes on beam Instrumentation and Diagnostics, Peter Forck, GSI

https://indico.cern.ch/event/1214547/contributions/5109013/attachments/2596536/4482436/juas_script.pdf

Veli Yıldız, Doktora Tezi:

https://cds.cern.ch/record/2128973/files/CERN-THESIS-2015-286_2.pdf

USPAS ders sunumu (Beam Current Monitors):

https://uspas.fnal.gov/materials/09UNM/BeamCurrentMonitors.pdf