

The Physics of Particle Accelerators

an introduction

Basic Lecture material,

The Physics of Particle Accelerators, Klaus Wille **Chapters: 4.1, 4.2**
and
HPFBU2012

Presented by, Öznur METE
20 February 2013, CERN

email: oznur.mete@cern.ch www: www.cern.ch/omete

- ▶ The process of injection and extraction
- ▶ CERN accelerator chain
- ▶ Particle sources
 - Thermionic sources
 - Photo-injectors (from HPFBU2012)

- ▶ **The process of injection and extraction**
- ▶ CERN accelerator chain
- ▶ Particle sources
 - Thermionic sources
 - Photo-injectors (from HPFBU2012)

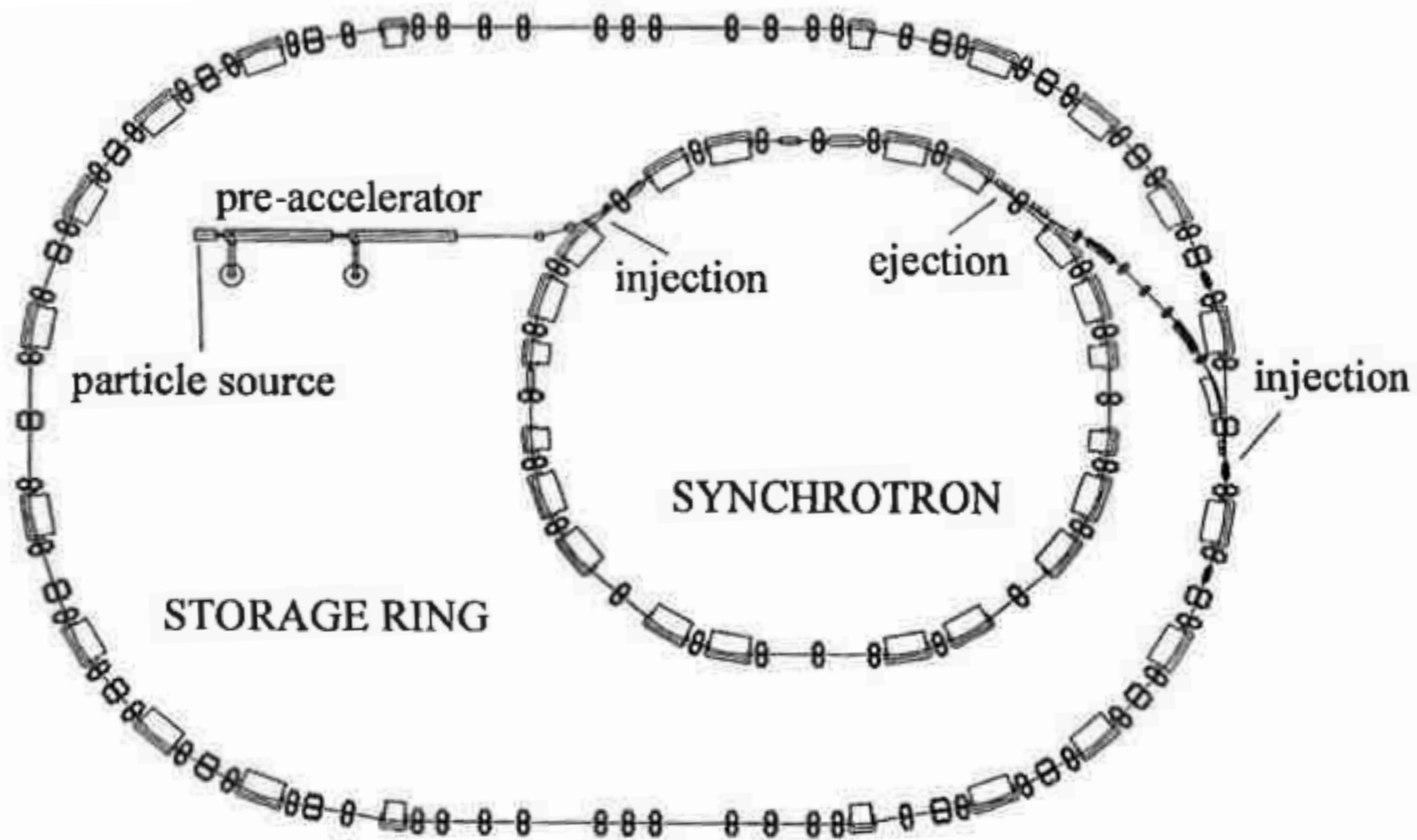


Fig. 4.1 Layout of a storage ring. The particles are emitted from a source and are then brought up to their final energy in a pre-accelerator and a main accelerator (synchrotron) before being injected into the storage ring.

Each stage of an accelerator system has a limited dynamic range and therefore a chain of stages is required to reach high energy. A combination of septa and kicker magnets is frequently used to inject and extract beam from each stage. The kicker magnets typically produce rectangular field pulses with fast rise- and/or fall-times, however, the field strength is relatively low. To compensate for their relatively low field strength, the kicker magnets are generally combined with electromagnetic septa. The septa provide relatively strong field strength but are either DC or slow pulsed.

Dynamic range

From Wikipedia, the free encyclopedia

For other uses, see *Dynamic range (disambiguation)*.

Dynamic range, abbreviated **DR** or **DNR**,^[1] is the ratio between the largest and smallest possible values of a changeable quantity, such as in signals like sound and light. It is measured as a ratio, or as a base-10 (decibel) or base-2 (doublings, bits or stops) logarithmic value.

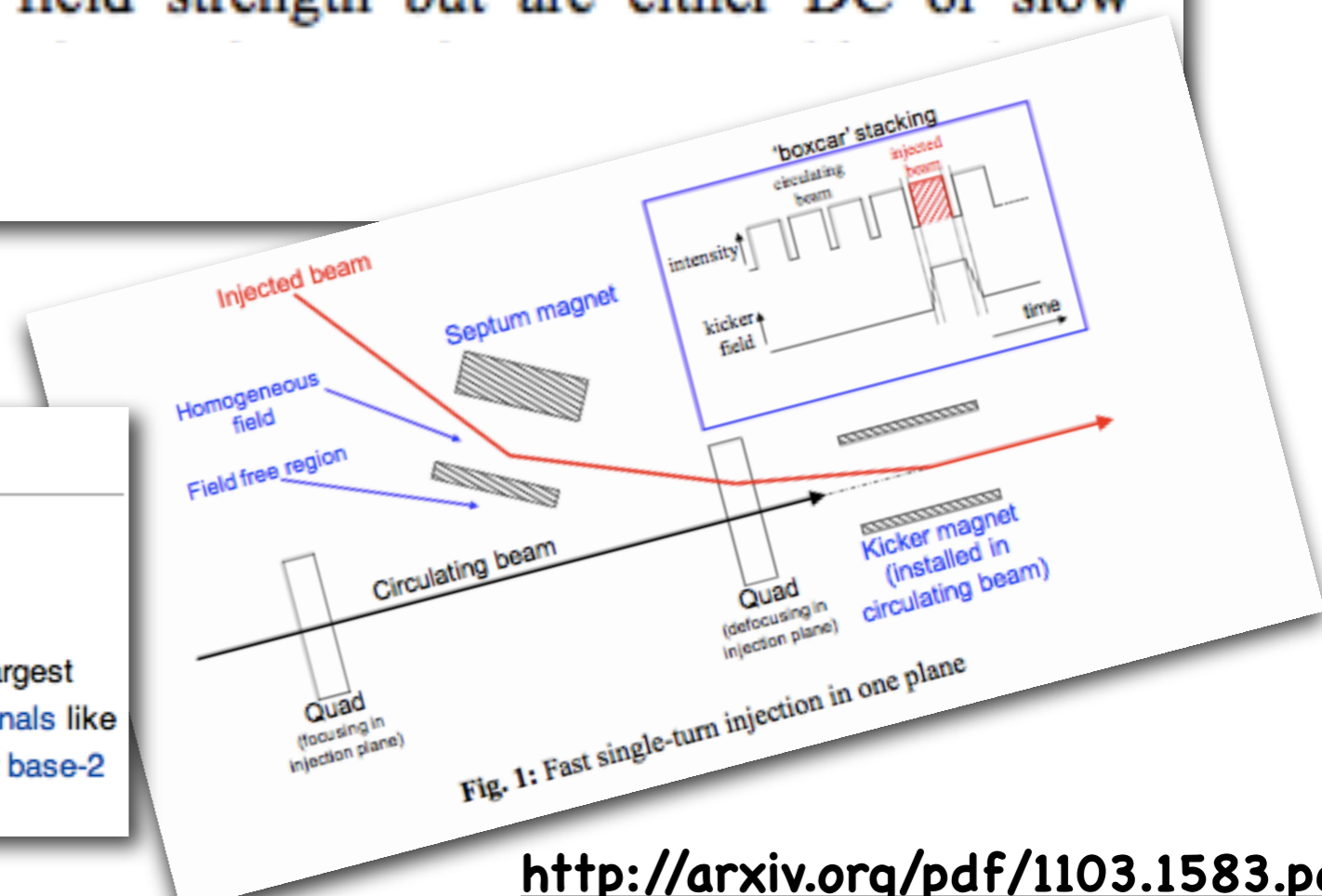
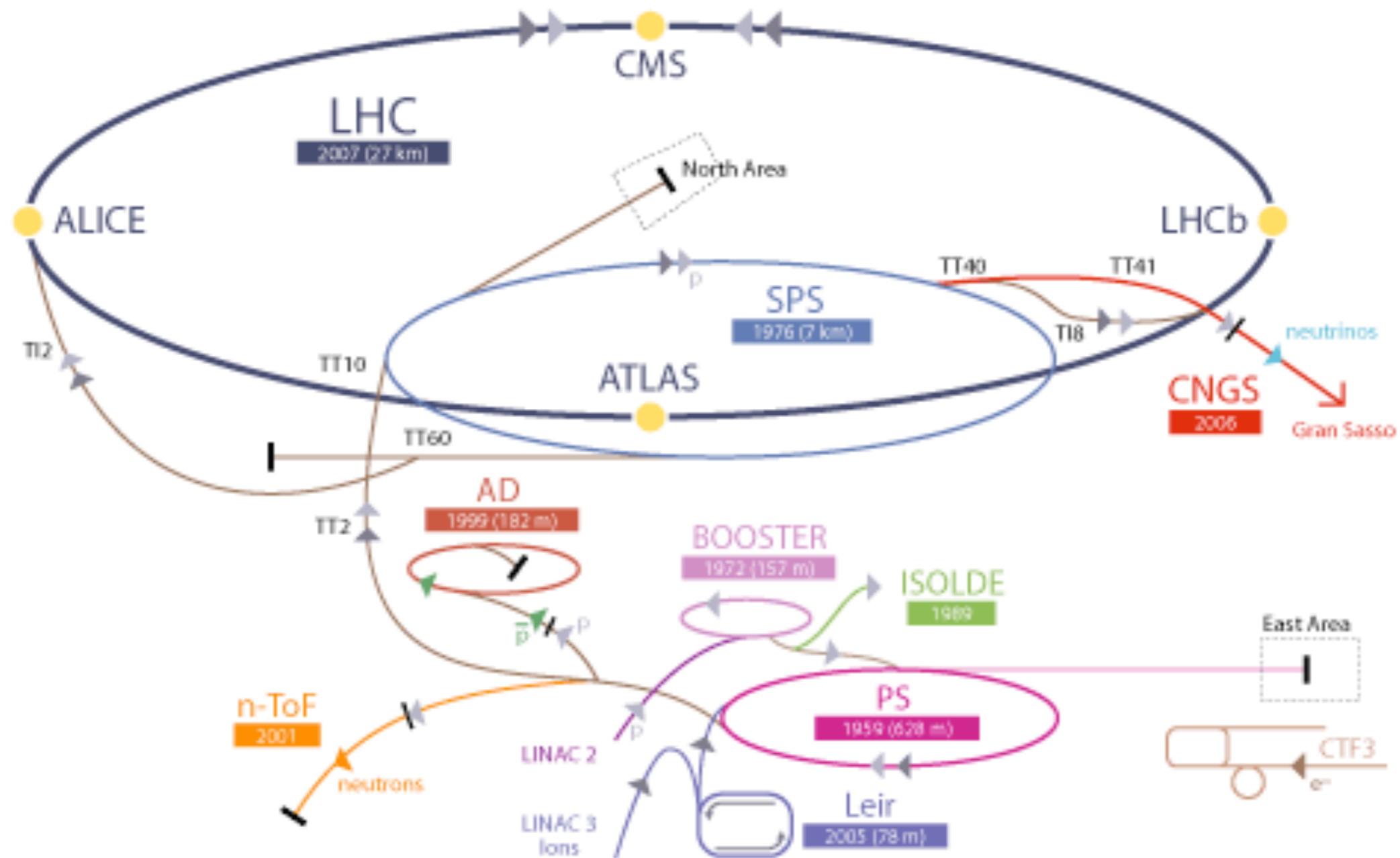


Fig. 1: Fast single-turn injection in one plane

<http://arxiv.org/pdf/1103.1583.pdf>

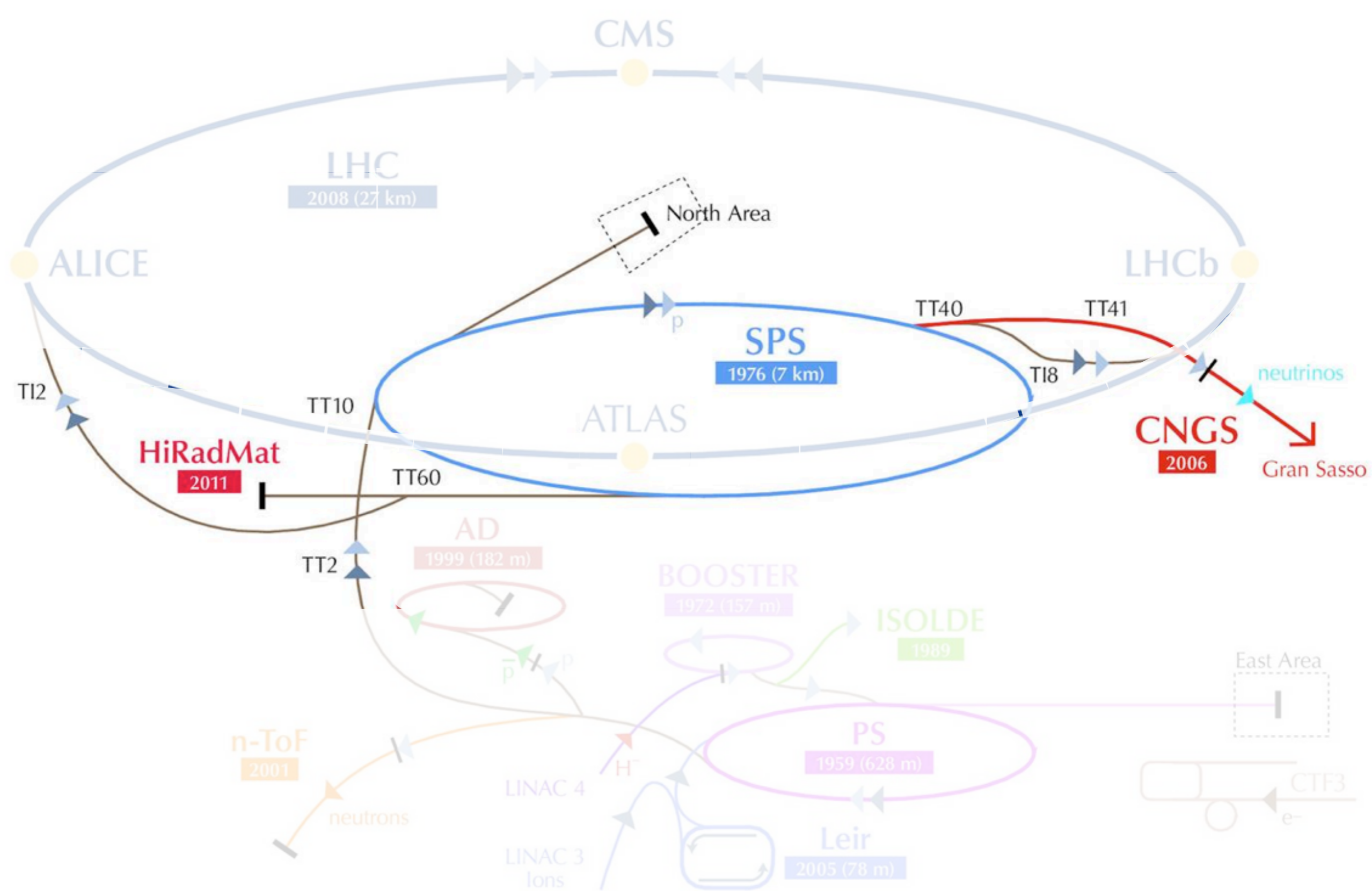
<http://arxiv.org/pdf/1103.1062.pdf>

- ▶ The process of injection and extraction
- ▶ **CERN accelerator chain**
- ▶ Particle sources
 - Thermionic sources
 - Photo-injectors (from HPFBU2012)



▶ p (proton) ▶ ion ▶ neutrons ▶ \bar{p} (antiproton) ▶ neutrinos ▶ electron
 ↔↔↔ proton/antiproton conversion

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron
 AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility
 CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINEar ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight



Injection from the SPS into the LHC, Long Straight Section 4 (LSS4)



Injection from the SPS into the LHC, Long Straight Section 6 (LSS6)



- ▶ The process of injection and extraction
- ▶ CERN accelerator chain

- ▶ **Particle sources**
 - Thermionic sources

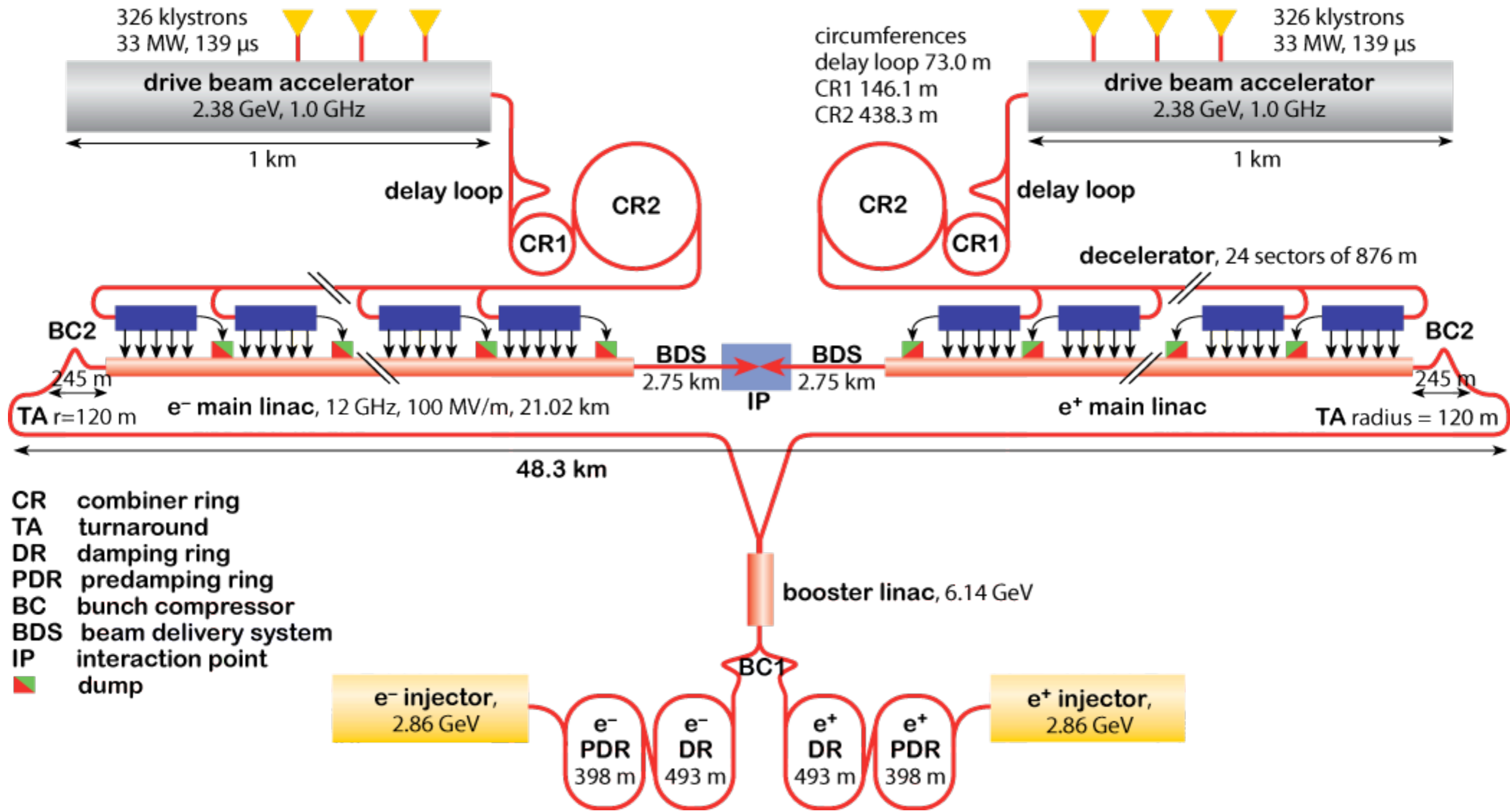
 - Photo-injectors (from HPFBU2012)

Kaynaklar konusu kapsamında:

- ▶ Bir örnek üzerinden düşünelim: CLIC Projesi ve elektron kaynakları
- ▶ Termiyonik (ısı) elektron kaynağı nedir?
- ▶ Foto-injektör (ışıksal elektron kaynağı) nedir ve ısı elektron kaynağına göre üstünlükleri nelerdir?
- ▶ CERN'deki CLIC projesi için PHIN ışıksal elektron kaynağının araştırma ve geliştirme çalışmaları.
 - PHIN foto-enjektörüne giriş
 - Demet özelliklerinin ölçülmesi, ölçüm aletleri, yöntemleri, PHIN'in işletmeye alma sürecinden başlıklar

Kaynaklar konusu kapsamında:

- ▶ Bir örnek üzerinden düşünelim: CLIC Projesi ve elektron kaynakları
- ▶ Termiyonik (ısı) elektron kaynağı nedir?
- ▶ Foto-injektör (ışıksal elektron kaynağı) nedir ve ısı elektron kaynağına göre üstünlükleri nelerdir?
- ▶ CERN'deki CLIC projesi için PHIN ışıksal elektron kaynağının araştırma ve geliştirme çalışmaları.
 - PHIN foto-enjektörüne giriş
 - Demet özelliklerinin ölçülmesi, ölçüm aletleri, yöntemleri, PHIN'in işletmeye alma sürecinden başlıklar



Bu ders kapsamında:

- ▶ Bir örnek üzerinden düşünelim: CLIC Projesi ve elektron kaynakları
- ▶ Termiyonik (ısı) elektron kaynağı nedir?
- ▶ Foto-injektör (ışıksal elektron kaynağı) nedir ve ısı elektron kaynağına göre üstünlükleri nelerdir?
- ▶ CERN'deki CLIC projesi için PHIN ışıksal elektron kaynağının araştırma ve geliştirme çalışmaları.
 - PHIN foto-enjektörüne giriş
 - Demet özelliklerinin ölçülmesi, ölçüm aletleri, yöntemleri, PHIN'in işletmeye alma sürecinden başlıklar

Bir metalik katodun ısıtılması ile katod yüzeyinden elektron yayınlama olayına “ısı yayılımı” denir. Aşağıdaki eşitlikle verilen Richardson yasası elektronların ısı yayılımının yayıcı yüzeyinin ısısının bir fonksiyonu olarak açıklar.

$$j_{iy} = c_3 T^2 \exp\left(-\frac{\phi}{k_b T}\right)$$

Burada j_{iy} yayınlanmış elektronların akım yoğunluğu, c_3 bir sabit, T yayıcı yüzeyin sıcaklığı, ϕ yayıcı metalin iş fonksiyonu ve k_b Boltzmann sabitidir.

Diode gun electron source

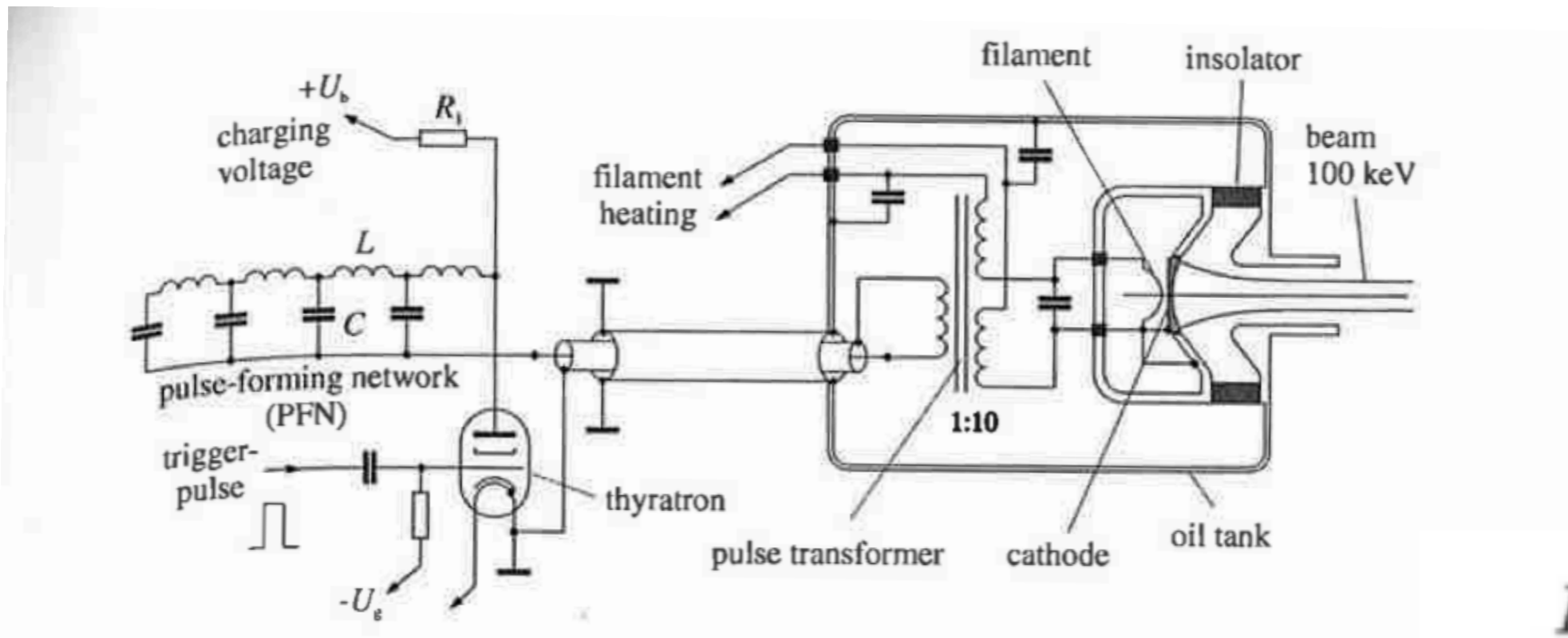
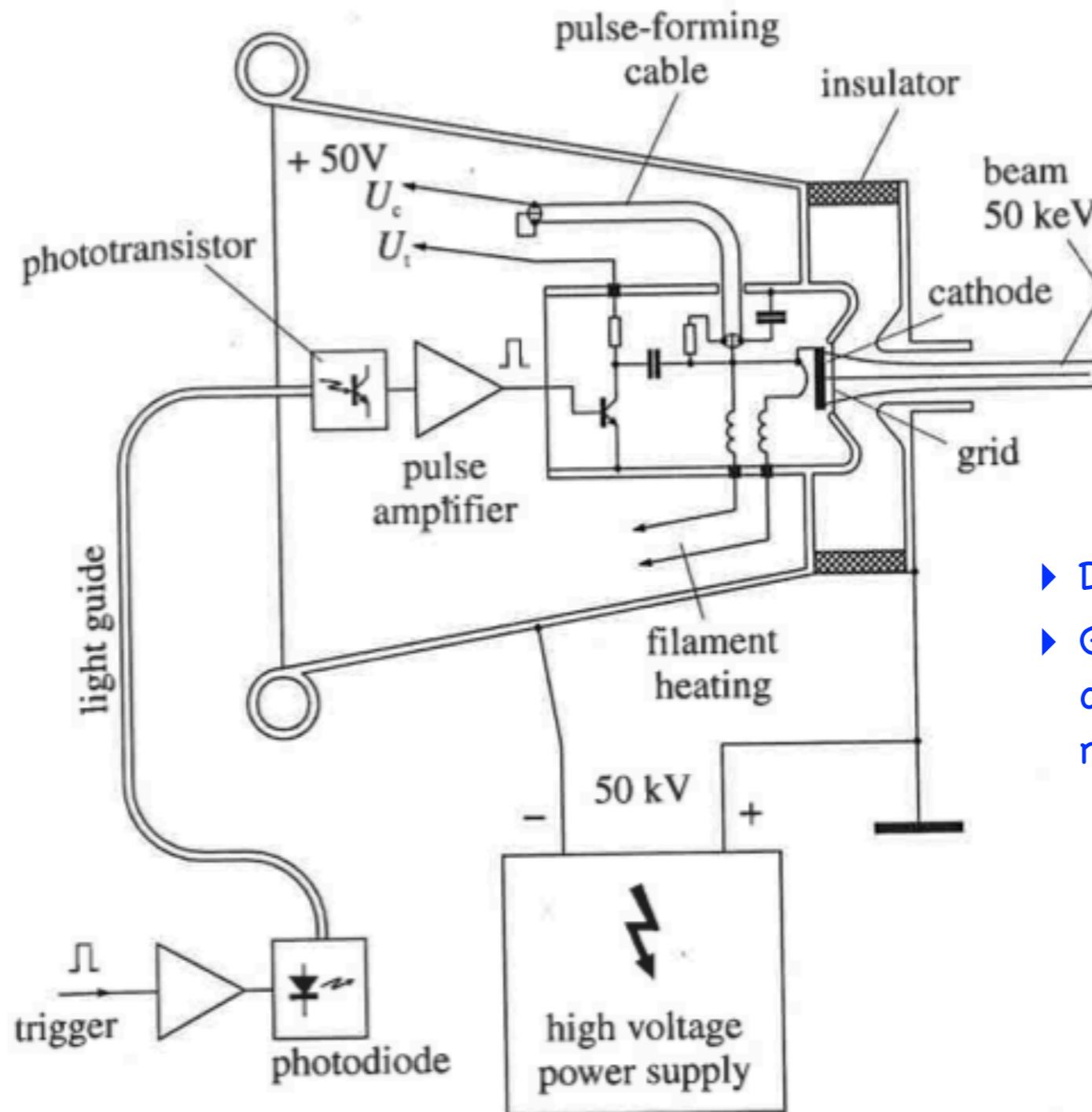


Fig. 4.2 Layout of a diode gun electron source. The voltage between the cathode and anode is produced by discharging the LC network in pulses across the thyatron.

$$I \propto U^{\frac{3}{2}}$$

- ▶ Diode gun, simplest electron source,
- ▶ Round cathode in vacuum, heated by an electrical filament to release electrons,
- ▶ Earthed anode with a hole bored on it where electrons can pass through,
- ▶ Produced current \leftrightarrow Anode-Cathode voltage: Langmuir and Schottky law,
- ▶ Space charge between anode-cathode, specially designed electrodes (Pierce system).
- ▶ No longer than $1\mu\text{s}$ pulses,
- ▶ Difficult to change the cathode due to the oil tank...

Triode gun electron source



- ▶ Down to ~ 1 ns pulses,
- ▶ Grid of fine wire mesh between cathode-anode, acts as a Faraday cage, reduces risks of discharge.

Fig. 4.3 Outline of a triode gun electron source. At rest, a potential of +50 V between the cathode and the grid blocks the flow of electrons. A very short pulse, with a duration determined by the length of the pulse-forming cable, briefly removes this barrier potential so that electrons are able to pass through the grid into the accelerating volume.

PIG ion source

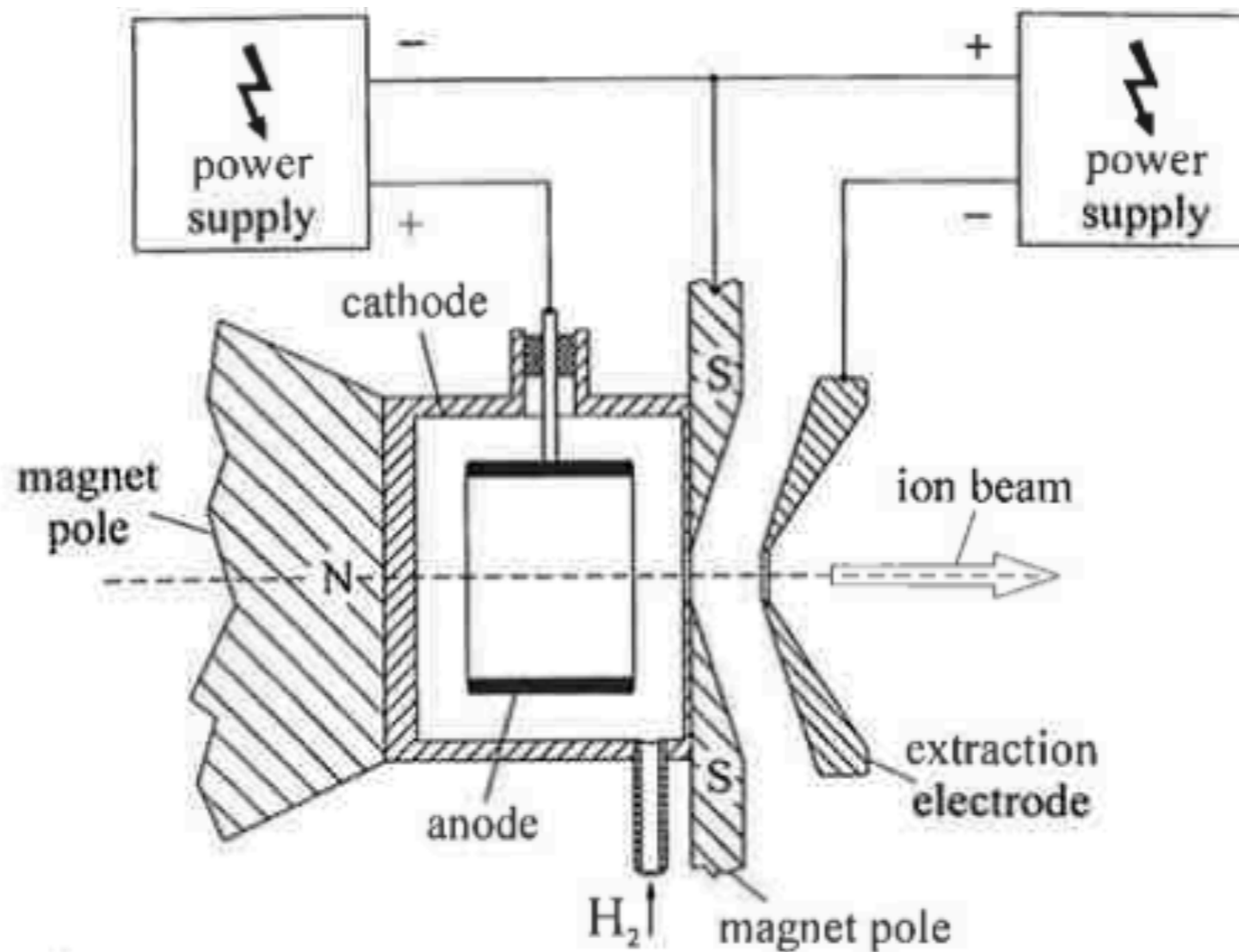
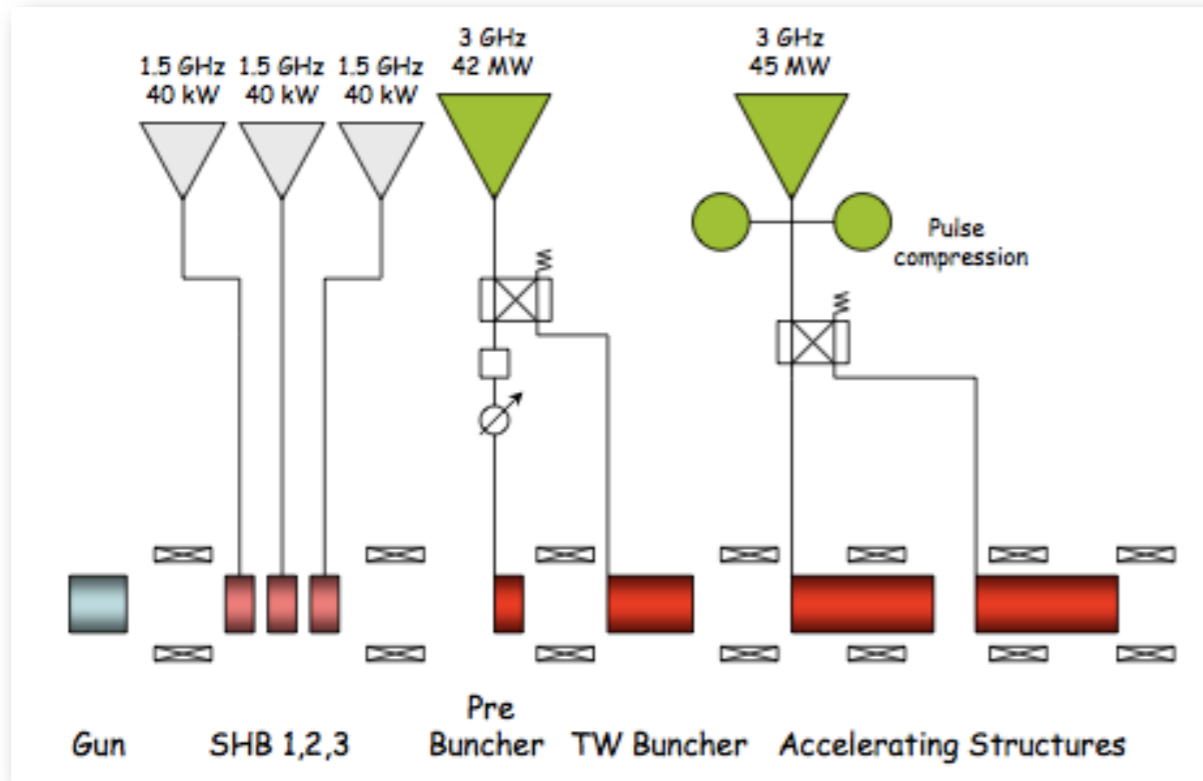


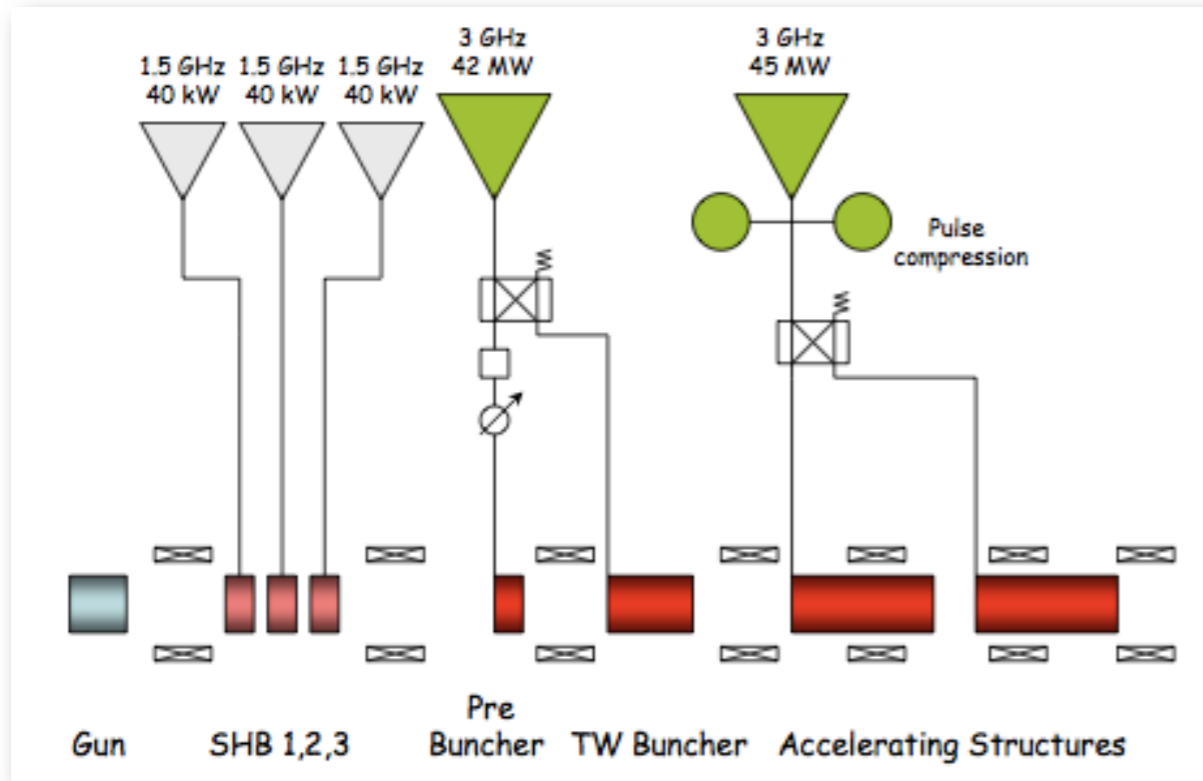
Fig. 4.4 Cross-section through a PIG ion source based on the Penning principle.



- ▶ Bir termiyonik tabancadan $1.6 \mu\text{s}$ uzunluğunda sürekli bir **sürücü demet** üretilir,
- ▶ daha sonra, demetin zamansal yapısı çeşitli aşamalardan sonra oluşturulur;
 - ▶ üç 1.5 GHz (sub-harmonic) alt-uyak bohçalayıcısı,
 - ▶ S-bandında ön-bohçalayıcı,
 - ▶ ilerleyen dalga bohçaşayıcısı.
- ▶ Bu aşamalardan sonra demet iki hızlandırma kovuğundan geçerek istenilen özelliklerde üretilmiş ve hızlandırıcıya enjekte edilmiş olur.

Sürücü demet: CLIC projesinde hızlandırma kovukları için güç sağlamak üzere kullanılacak yardımcı elektron demeti.

Kaynak çıkışında bizden beklenen demet özellikleri nelerdir?

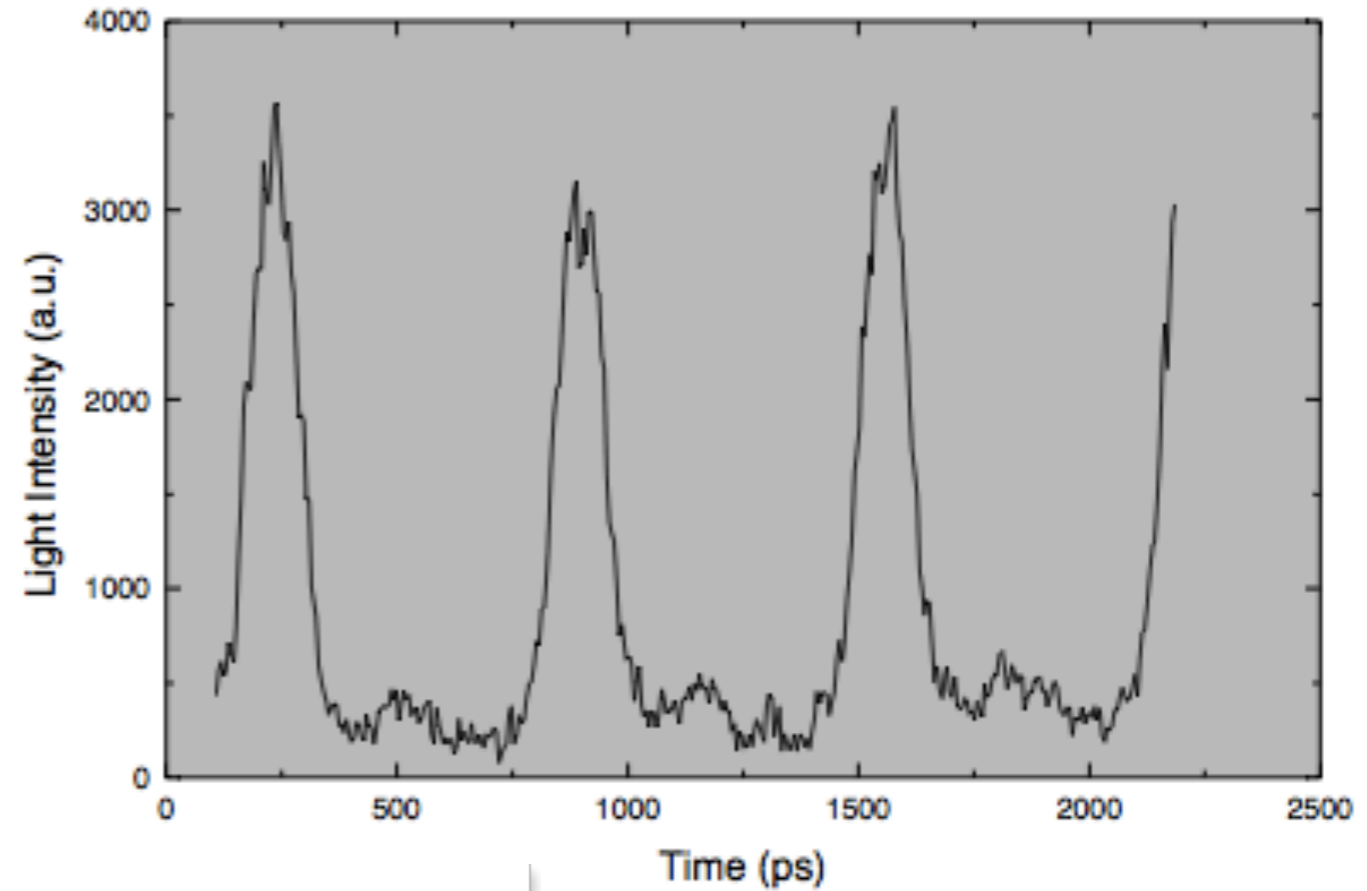
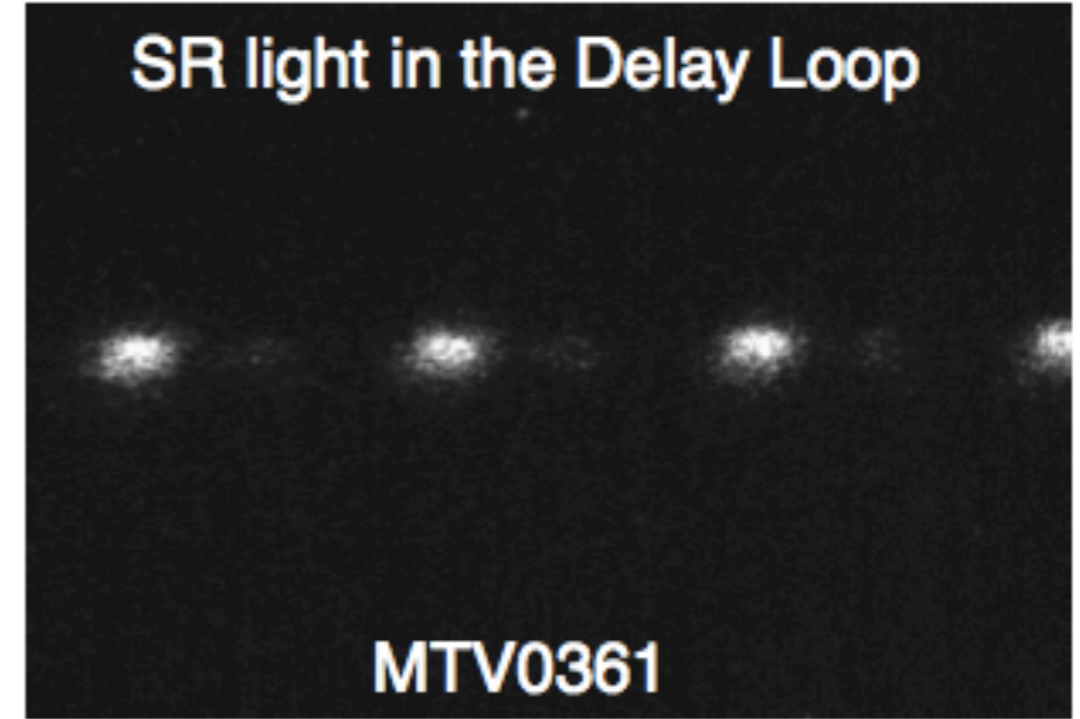


Parametre	Değeri
Enerji [MeV]	20
Akım [A]	3.5
Atma Treni Uzunluğu [μ s]	1.6
Bohça Sayısı / Tren	2310
Bohçalar Arası Uzaklık [ns]	0.67
Bohça Uzunluğu (FWHM) [ps]	8
Yük / Bohça [nC]	2.33
Enerji Dağılımı (%)	<1
Normalize Yayınım [mm mrad]	<25

Sorun, parazitik yük (Uydu Bohçalar)

(Streak) **Çizgi kamerası** ile yapılan ölçümler ile parazitik bohçalar gözlenebilir.

- ▶ Alt-uyak bohçalayıcısından dolayı %7-8 parazitik yük (uydu bohça) oluşumu gerçekleşir.
- ▶ Uydu bohçaların içindeki yük hızlandırıcının geri kalanında kullanılamaz hale gelmektedir.
- ▶ Uydu bohça ana demet hızlanmasını olumsuz etkiler.
- ▶ Tıkızlık (compactness), zamansal yapıdaki esneklik ve kararlılık açılarından ısı kaynakları yeterli değildir.

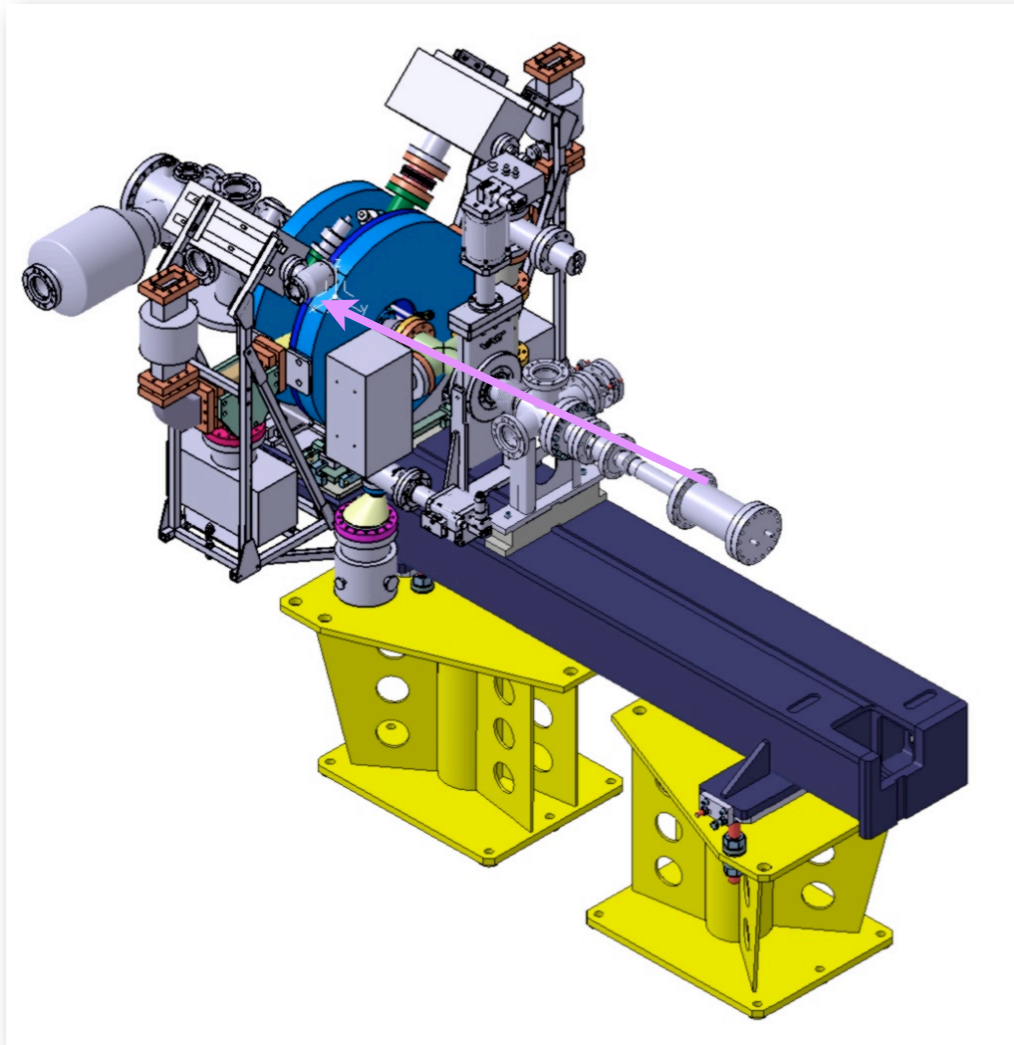


Çizgi kamerasının çalışma prensibi tanı yöntemleri dersinde

Kaynaklar konusu kapsamında:

- ▶ Bir örnek üzerinden düşünelim: CLIC Projesi ve elektron kaynakları
- ▶ Termiyonik (ısı) elektron kaynağı nedir?
- ▶ Foto-injektör (ışıksal elektron kaynağı) nedir ve ısı elektron kaynağına göre üstünlükleri nelerdir?
- ▶ CERN'deki CLIC projesi için PHIN ışıksal elektron kaynağının araştırma ve geliştirme çalışmaları.
 - PHIN foto-enjektörüne giriş
 - Demet özelliklerinin ölçülmesi, ölçüm aletleri, yöntemleri, PHIN'in işletmeye alma sürecinden başlıklar

Foto-injektör (ışıksal elektron kaynağı) nedir?



- ▶ Foto-enjektör **lazer** atmalarını kullanarak metalik ya da yarıiletken bir **katot** yüzeyinden **fotoyayınım** (photoemission) sürecinden yararlanarak elektron çıkartan bir elektron kaynağıdır.
- ▶ Elektron demeti lazerin zamansal yapısını almaktadır. Böylece fotoenjektör ek bir bohçalama sistemine gerek duymayan **tıkız bir sistemdir**.
- ▶ Katotdan sonra yerleştirilen bir **RF kovuk** ile elektronların çabucak hızlandırılmaları sağlanır.
- ▶ Düşük enerjide uzay yükü etkisi altındaki **demet yayınımlı karşılanması** RF kovuk çevresine yerleştirilecek iki solenoid magnet ile yapılır.

Yakın zamandaki fotoenjektörler için tasarım parametreleri.

Parameter	BNL (BOE- ING)	SLAC (LCLS)	FNAL (A0)	DESY (TESLA 500)	DESY (PITZ)	DESY (FLASH)	INFN (SPARC)	PSI (Swiss FEL)	ELBE (SRF Gun)	CERN (PHIN)
Purpose	ERL	FEL	Linear Collider	Linear Collider	X-FEL	X-FEL	X-FEL	X-FEL	FEL	DB*
First Operation	1992	-	1999	-	2002	2004	2006	2010	2009	2008
Number of Cells	4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	2.5	3.5	2.5
Frequency (MHz)	433	2856	1300	1300	1300	1300	2856	2997.9	1300	2998.55
Macropulse (μs)	10000	-	-	800	800	800	-	1.2	CW	1.27
Repetition Rate (Hz)	30	120	-	10	10	5	1-10	10	1000	5-50
RF Gradient (MV/m)	26	120	35	35	60	43	120	25	50	85
Cathode Type	K_2CsSb	Cu/Mg	Cs_2Te	Cs_2Te	Cs_2Te	Cs_2Te	Cu/Mg	Cu	Cs_2Te	Cs_2Te
Quantum Efficiency (%)	5-12	$\sim 10^{-5}$	1	1	2-10	2-10	10^{-4}	10^{-5}	1	3
Laser	-	$Nd : YLF$	$Nd : YLF$	$Nd : YLF$	$Ce : YAG$	$Nd : YLF$	$Ti : Sa$	$Ti : Sa$	$Nd : YLF$	$Nd : YLF$
Wavelength (nm)	527	255	263	262	257	262	266	250-300	262	266
Laser Energy / Pulse (μJ)	0.47	200	30	5	1	1	500	200	-	0.37
Laser Spot Size FWHM (mm)	3-5	2.5	-	6.3	0.2-3	3.5	-	0.1-0.27	2.7	2-4
Pulse Length FWHM (ps)	53	10-20	10	7.4	20	20	10	3-10	20	8
Beam Energy (MeV)	5	5	3.8	3.8	6.6	5	5.6	6.6	9.5	5.5
Charge/Bunch (nC)	1-7	1	8	8	1	1	1.1	0.2	1	2.33
Energy Spread (%)	2-3	0.1	1.15	1.15	1-2	1-2	0.2	-	-	1
Norm. Trans. Emittance (mm mrad)	20-40	1	19.3	20	0.9	1.5	2	<0.4	2.5	14

* Drive Beam

Ö. Mete, Doktora Tezi, S29

Işıl kaynakların tarihi gelişimlerinden başlıklar (S. J. Russel'in tablosuna eklemelerle).

Year	Highlight	Ref.
1985	First photoinjector experiment at LANL.	[25]
1988	Stanford FEL has been driven by a photoinjector.	[46]
	Theory of emittance compensation has been proposed.	[36]
1989	First high gradient S-band photoinjector at BNL.	[47]
1991	First RF integrated photoinjector with emittance compensation at LANL.	[48]
1992	High duty factor, RF photoinjector experiment at Boeing.	[49]
	First photocathode in a superconducting cavity.	[50]
1993	LANL photoinjector driven FEL lasers in the UV.	[51]
1995	Experimental demonstration of the emittance compensation.	[52]
1996	First operation of DC photoinjector at TJNAF.	[53]
	Experimental demonstration of microbunching in a photoinjector.	[54]
1997	Envelope analysis of emittance compensation.	[55]
1999	TJNAF FEL demonstrates 1.72 kW average power.	[56]
2000	First systematic measurement of multipacting in a photocathode RF gun.	[57]
2001	First operation of an X-band (8.547 GHz) photoinjector.	[58]
2002	First operation of a superconducting RF photoinjector.	[59]
2003	The initial studies on the use of needle cathodes in photoinjectors to enhance the beam brightness.	[60]
2007	SPARC has done the first direct observation of the double emittance minimum.	[61]
2008	First Operation of PHIN photoinjector.	[62]
2009	The first simultaneous demonstration of emittance compensation and velocity bunching.	[63]

*The modifications to the original table have been denoted with bold blue fonts.

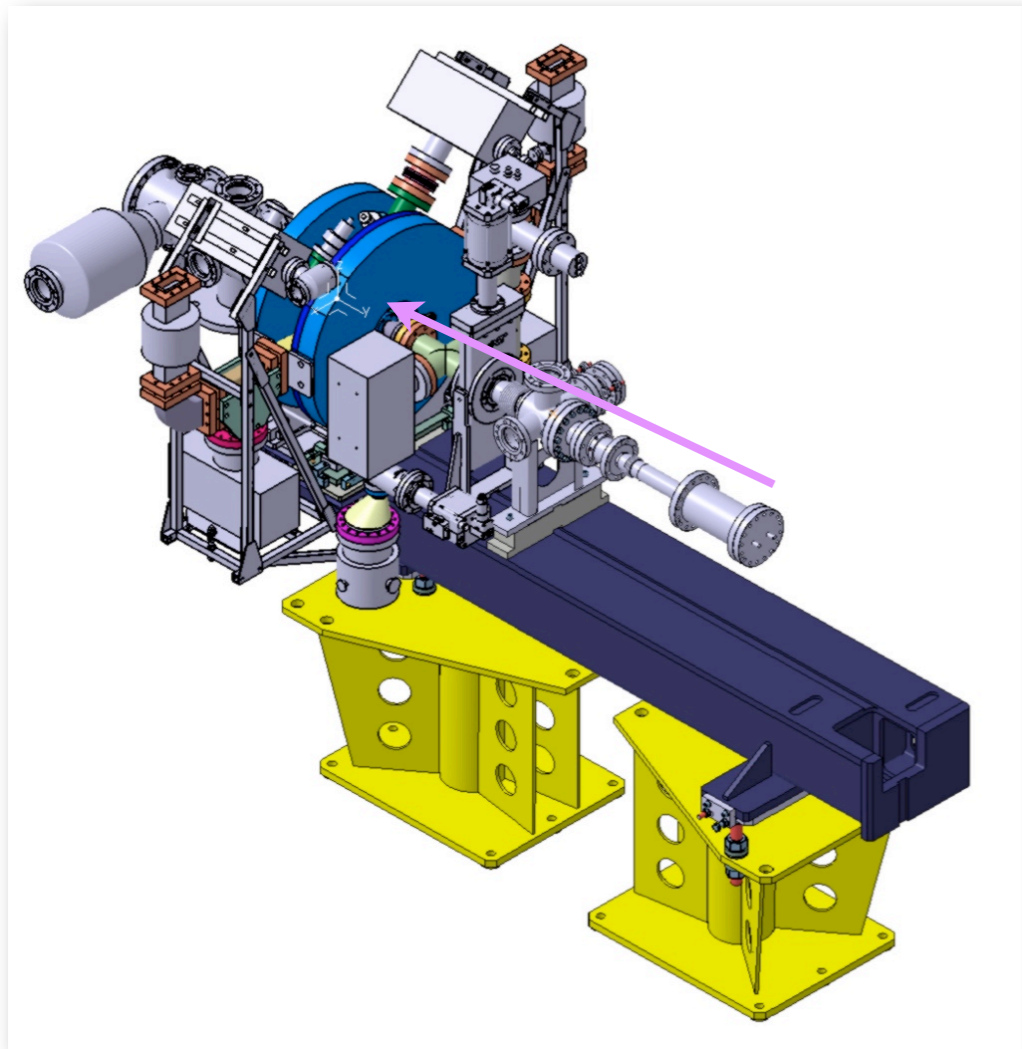
1985 -- İlk ışıksal kaynak deneyi.

Kaynaklar için:

http://omete.web.cern.ch/omete/OM/research_files/references.pdf

Kaynaklar konusu kapsamında:

- ▶ Bir örnek üzerinden düşünelim: CLIC Projesi ve elektron kaynakları
- ▶ Termiyonik (ısı) elektron kaynağı nedir?
- ▶ Foto-injektör (ışıksal elektron kaynağı) nedir ve ısı elektron kaynağına göre üstünlükleri nelerdir?
- ▶ CERN'deki CLIC projesi için PHIN ışıksal elektron kaynağının araştırma ve geliştirme çalışmaları.
 - PHIN foto-enjektörüne giriş
 - Demet özelliklerinin ölçülmesi, ölçüm aletleri, yöntemleri, PHIN'in işletmeye alma sürecinden başlıklar



- ▶ CTF3 termiyonik kaynağının çıkışındaki demet özelliklerini sağlamak üzere tasarlanmış bir fotoenjektördür.
- ▶ Proje CARE (Coordinated Accelerator Research in Europe) programı çerçevesinde gerçekleştirilmektedir.
- ▶ Çeşitli kurum ve kuruluşların işbirliği ile yürümektedir...

“Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL)”

RF tabanca

“Rutherford Appleton Laboratory (RAL)”

Lazer

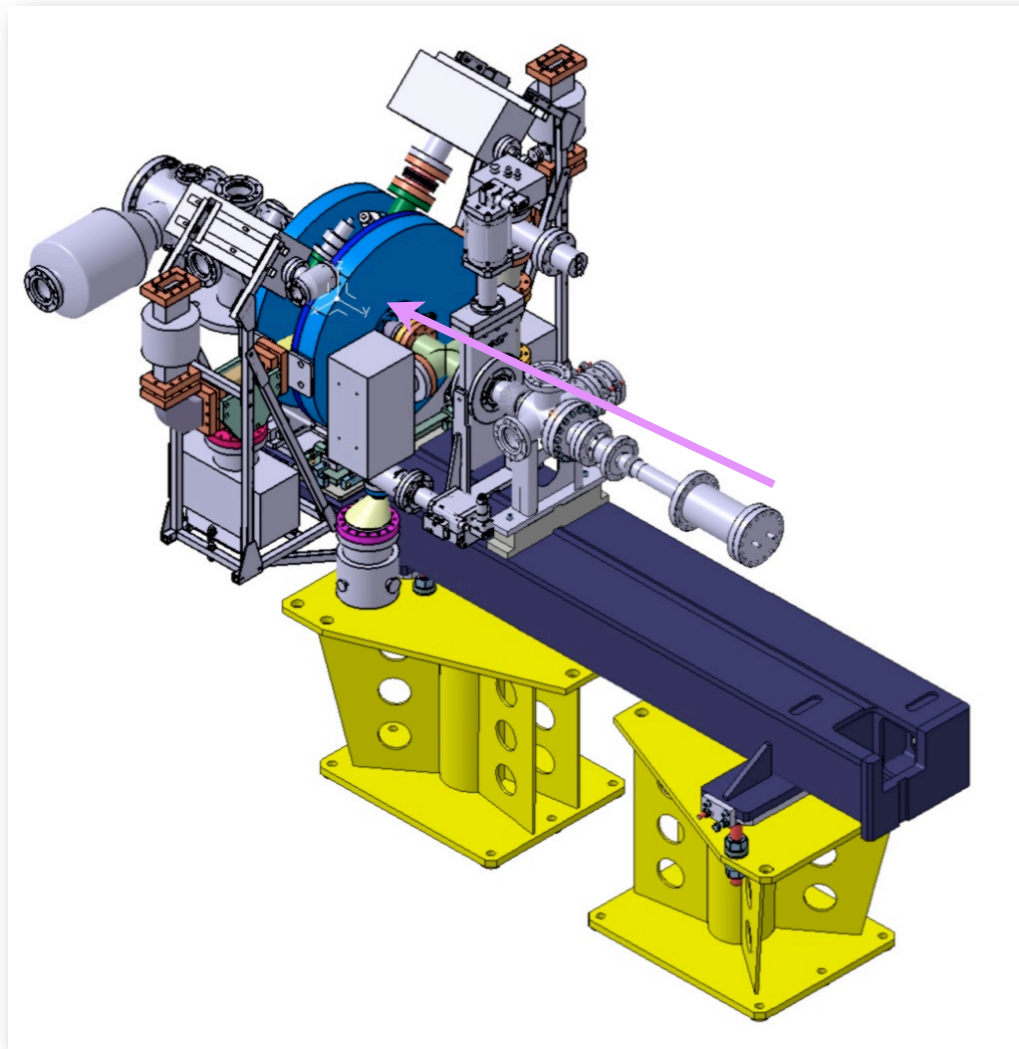
“European Organization for Nuclear Research (CERN)”

Fotokatot üretimi,

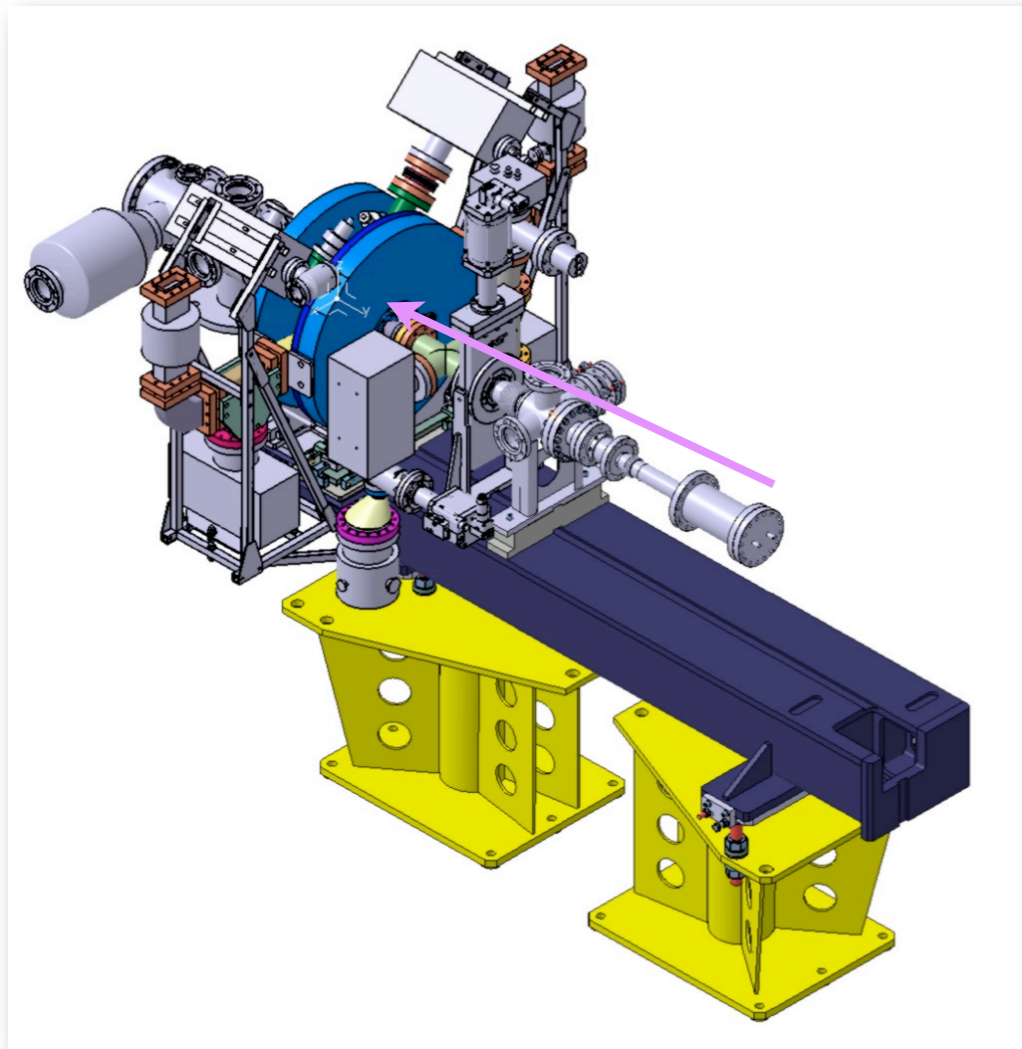
Genel düzenleme,

İşlemeye alma sürecindeki test çalışmaları.

PHIN'in sağlaması gereken parametreleri ve değerlerini hatırlayalım.



Parametre	Değeri
RF	
RF Gradyeni (MV/m)	85
RF Sıklığı (GHz)	2.99855
Elektron Demeti	
Bohça başına yük (nC)	2.33
Tren başına yük (nC)	4446
Tren uzunluğu (ns)	1273
Bohça uzunluğu (ps)	8
Bohça sayısı / Tren	1908
Akım (A)	3.5
Normalize yayılım (mm mrad)	<25
Enerji yayılımı (%)	<1
Enerji (MeV)	5.5
Lazer ve Katot	
Yük Karalılığı (%)	<0.25 rms
Katot	Cs ₂ Te
Kuantum Verimliliği (%)	3
UV Lazer Enerjisi / Atma (nJ)	370
Mikroatma Tekrarlama Hızı (GHz)	1.5
Makroatma Tekrarlama Hızı (Hz)	1-5



- ▶ Fotoenjektör kavramının ortaya çıkışı ve ilk uygulamaları 1980'lere kadar geriye gitmektedir.
- ▶ **PHIN enjektörünü özgün yapan özellikleri, tasarım değerleri (specifications) aşağıda sıralanmıştır.**
 - ▶ *Bohça başına yük* 2.33 nC
 - ▶ 1.2 μ s uzunluğunda 1908 bohçadan oluşan bohça treni.
 - ▶ Zorlayıcı kararlılık gereksinimi. Örneğin: Tren boyunca genlik (yük) kararlılığı %0.25 olması gerektiği belirlenmiştir.

Bir ışıl kaynak tasarırken düşünülmesi gerekenlere örnekler nelerdir? Nereden başlamalıyız?

► Belirtilen, gereken yük miktarının üretilmesi ve iletilmesi gerekecektir.

- Lazer beneğinin ölçüsü (yarıçapı),
- Elde edilebilen en yüksek alan gradyeni,
- Parçacıkların RF alanına göre yayılım evreleri.

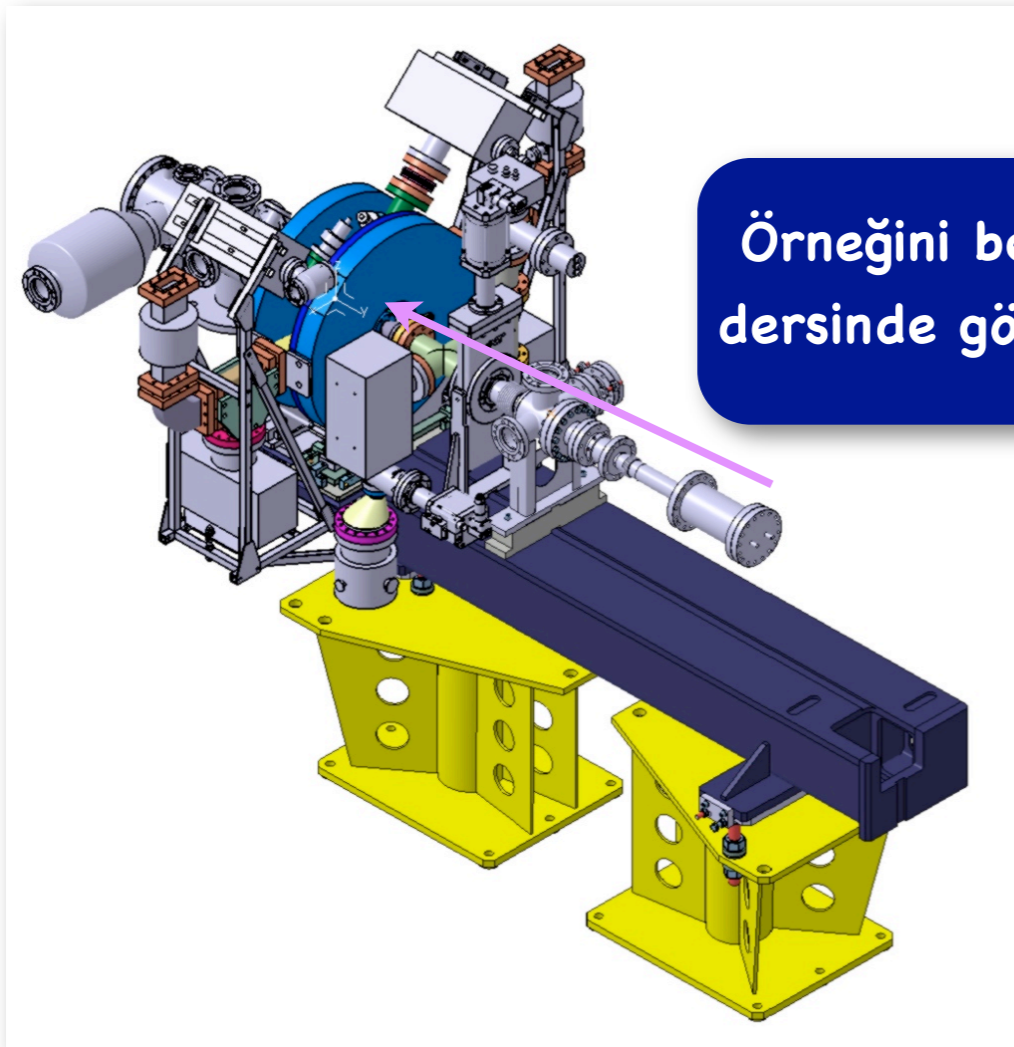
$$Q_{max} [nC] = \frac{E_{acc} [MV/m] \sigma_x^2}{18}$$

$$E_{0,max} = 8.47 + 1.57 \sqrt{f [MHz]}$$

► En düşük demet yayılımı veya en düşük enerji yayılımını sağlayan çalışma noktaları arasında ödün verilmesi gerekecektir.

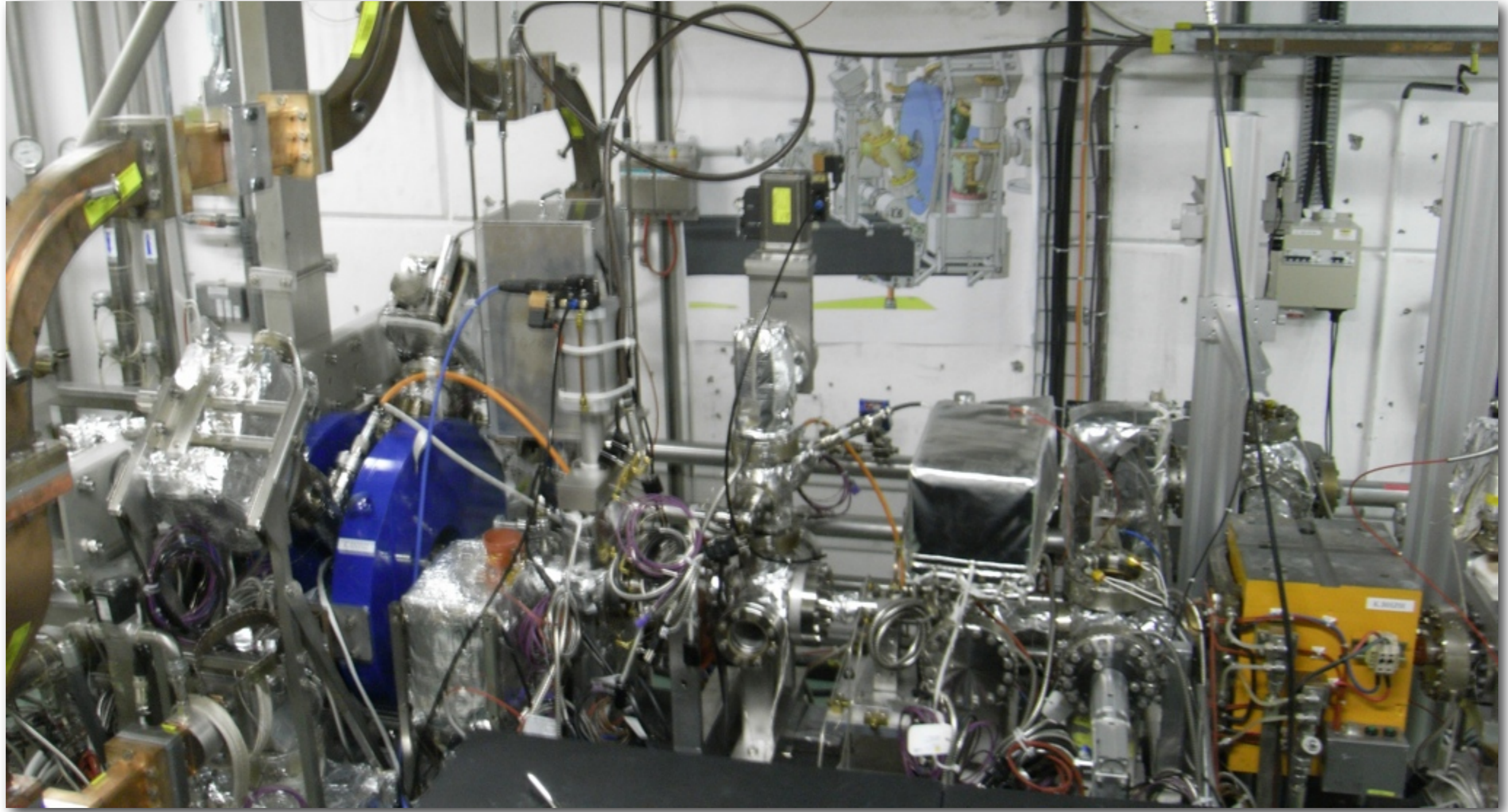
- Yine de, demet yayılımı karşılması için uygun odaklama sağlanabilir.

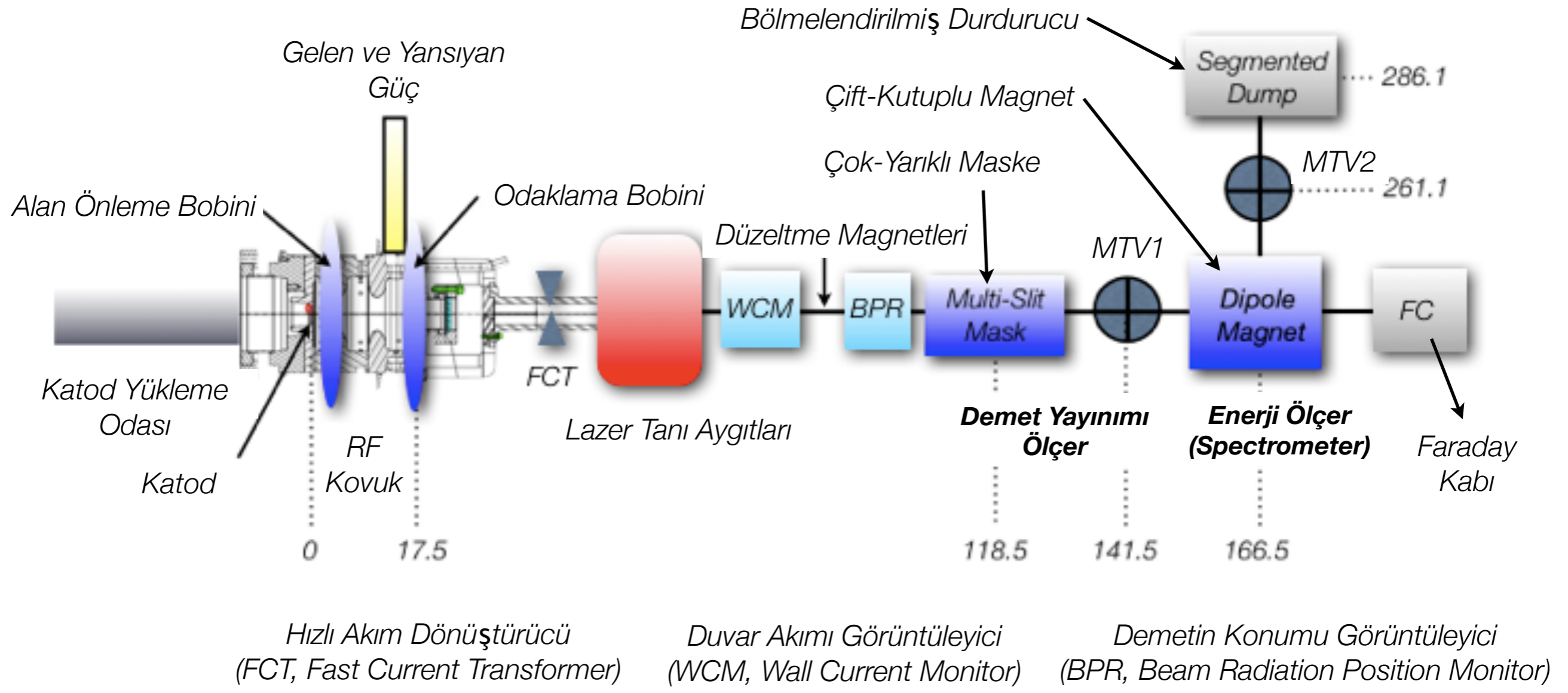
► Bunlara benzer bir dizi nokta göz önünde bulundurularak elektron kaynağı için çeşitli koşullar altında farklı çalışma noktaları belirlenebilir.



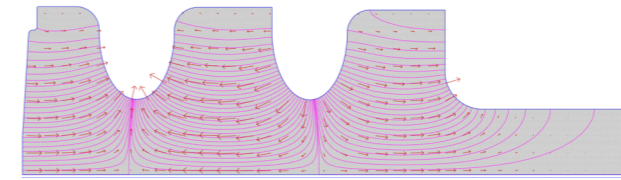
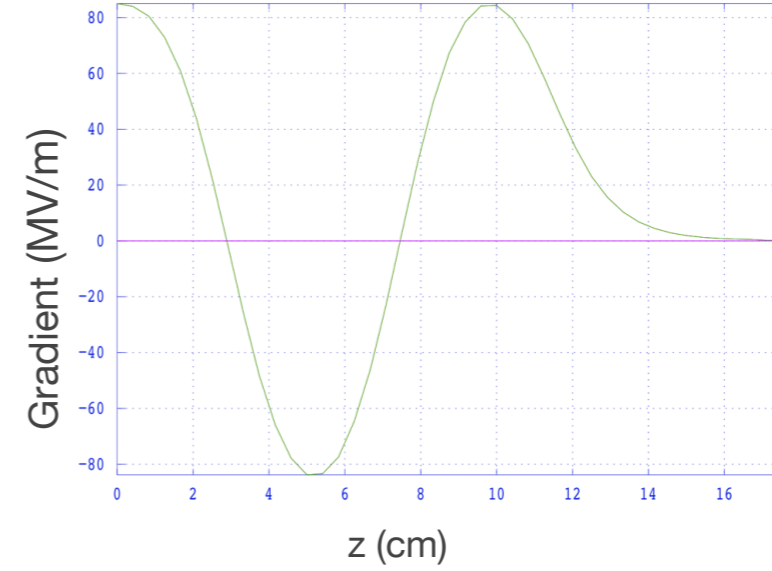
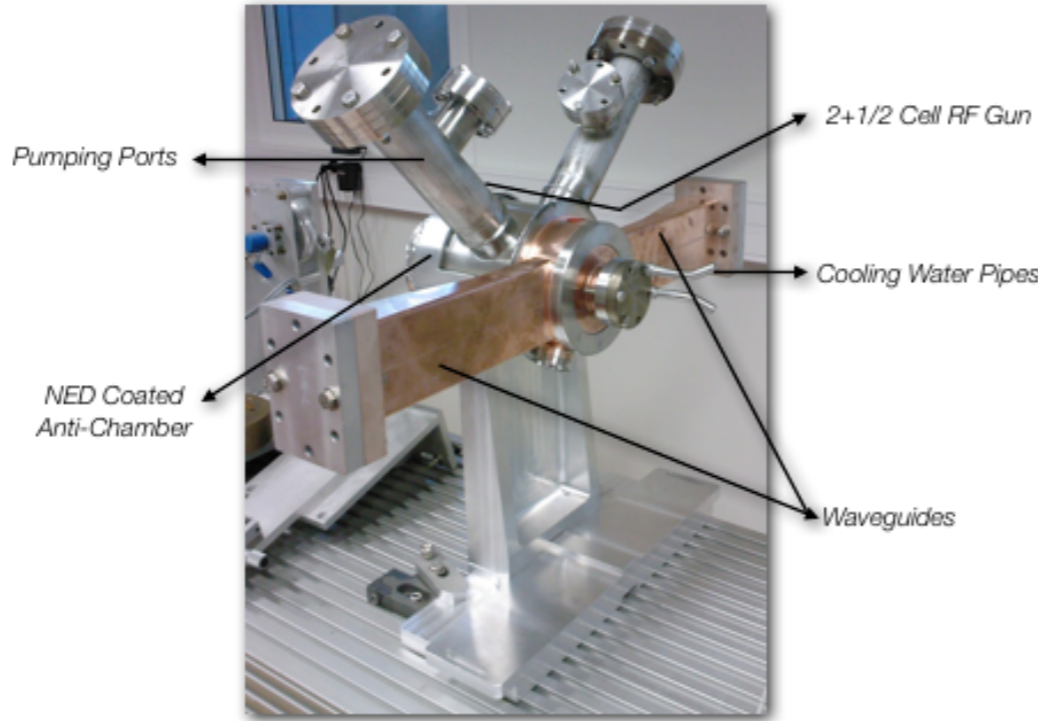
Örneğini benzetim dersinde göreceğiz.

Uygunlaştırma çalışmaları için C. Travier tarafından sunulan kullanışlı model örnek olarak alınabilir.
[Kaynak] Christian Travier. "An introduction to photo-injector design". NIMA, 340(1):26 – 39, 1994

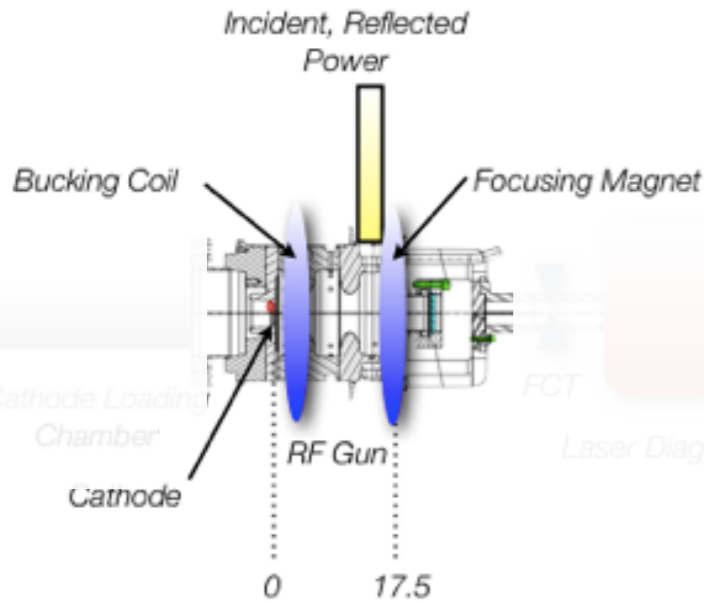




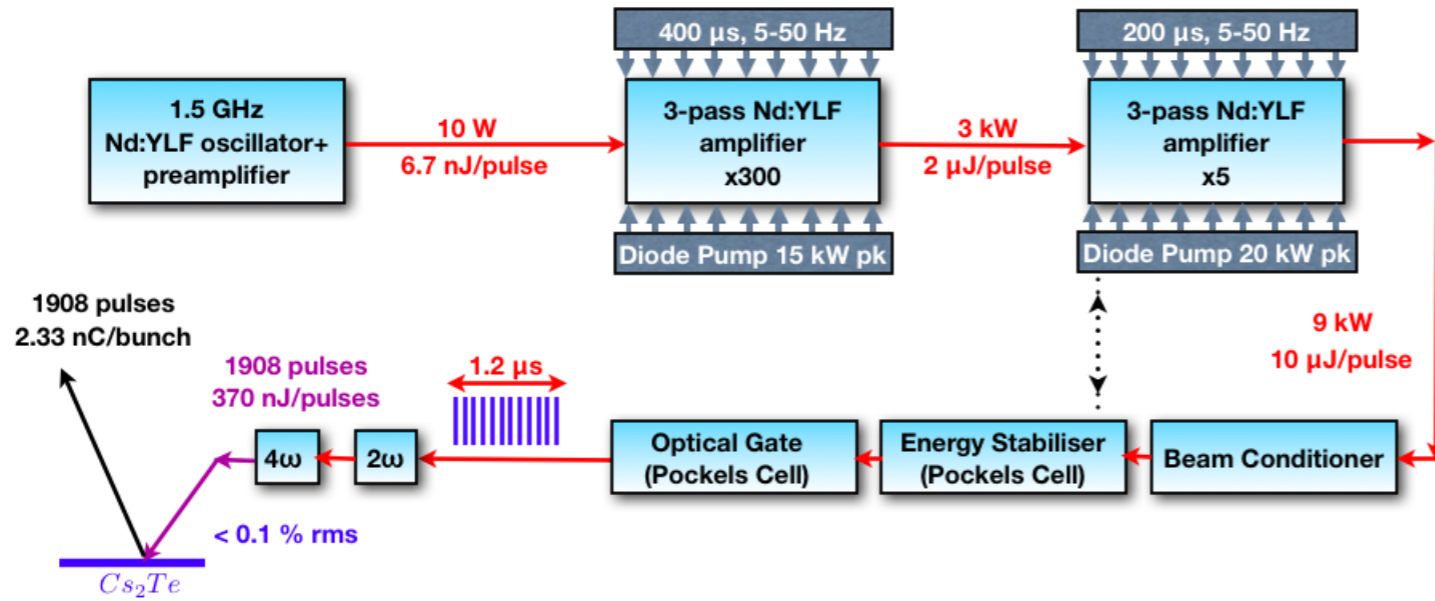
RF Gun



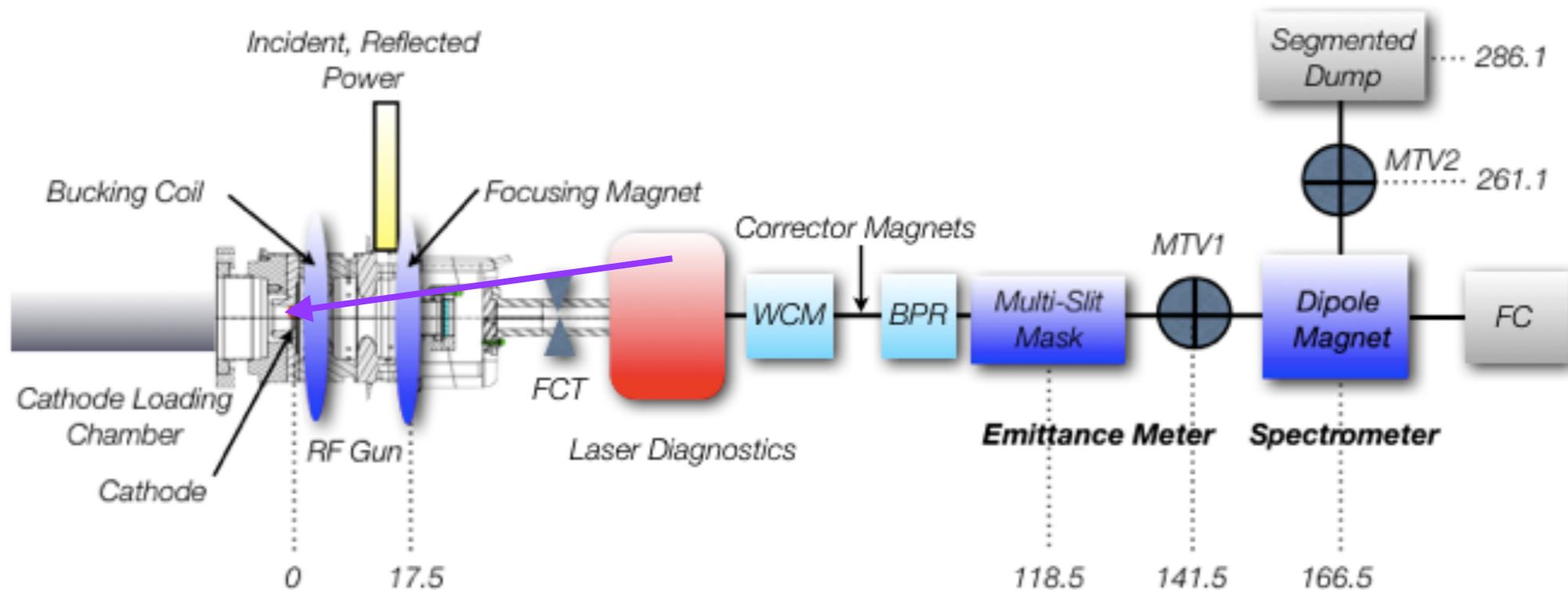
- ▶ Normal iletken 2+1/2 hücreli RF kovuktur.
- ▶ S-band için (3GHz) π -modda ayarlanmıştır.
- ▶ Hızlandırma 85 MV/m'lik gradyen altında gerçekleşir.
- ▶ RF kovuk benzetimleri SUPERFISH programı kullanılarak yapılmıştır.
- ▶ SUPERFISH benzetimleri sonucunda üretilen alan haritası PARMELA demet dinamiği benzetimlerinde girdi olarak kullanılmıştır.
- ▶ Yüksek yük değeri, düşük elektriksel kırılma, ve karanlık akım için uygunlaştırılmıştır (yarım hücre duveri açısı, eliptik iris)
- ▶ İyi dinamik vakum sağlayacak şekilde uygunlaştırılmıştır (Non-Evaporable Getter, NEG, ön-odacığı gaz alıcı kaplama yapılmıştır.).
- ▶ Uygun demet odaklanmasını sağlamak için çevresine iki solenid yerleştirilmiştir.



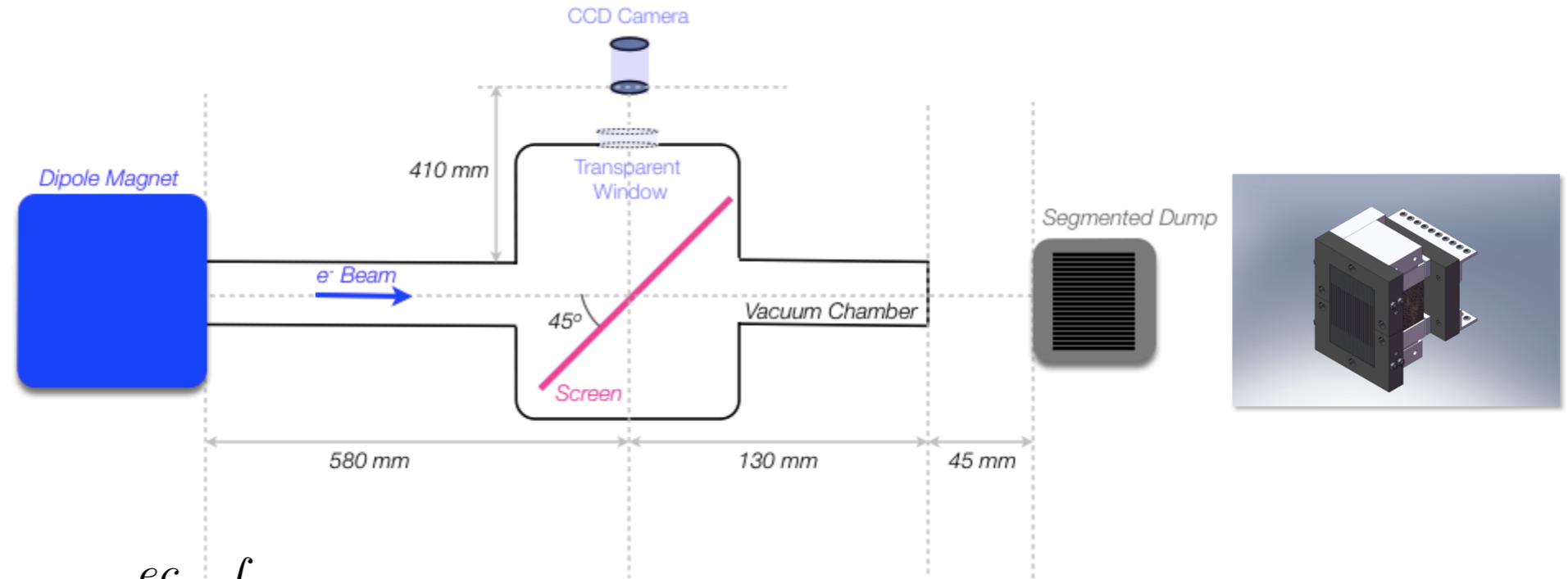
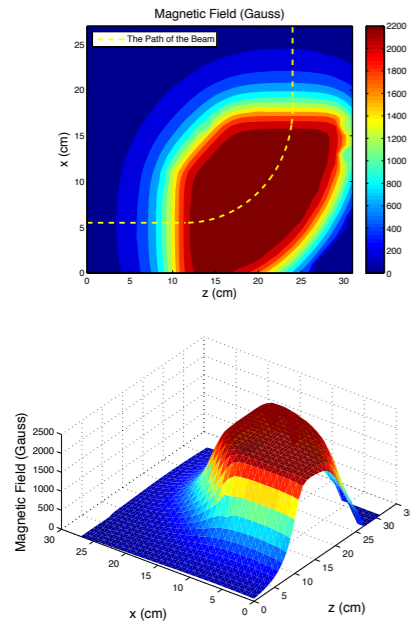
Laser



- ▶ Nd:YLF (Neodymium-doped yttrium lithium fluoride) kristali salıncı olarak kullanılarak 1.5 GHz iç yapılı sürekli atma trenleri oluşturulur.
- ▶ Çeşitli yükseltme basamaklarından sonra atma başına enerji 6.7 nJ'den 370 nJ'e kadar çıkarılır (UV dönüşümünden sonra).
- ▶ Atma treni uzunluğu, Pockels hücreleri kullanılarak 1.2 μs olarak ayarlanır.
- ▶ UV dönüşümü gerçekleştirilir.
- ▶ Üretilen bu lazerle bir Cs₂Te katod yüzeyi aydınlatılır.

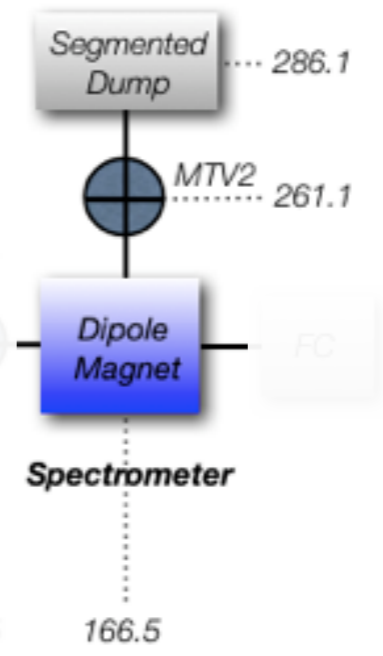


Spectrometre

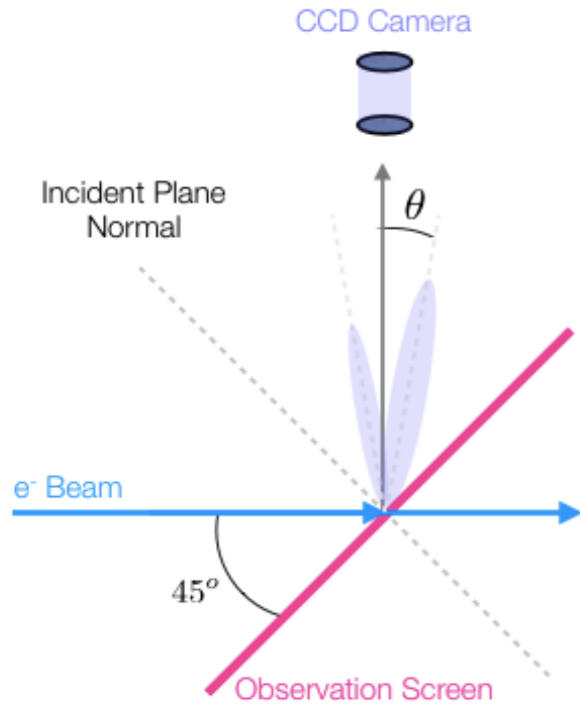


$$E = \frac{ec}{\alpha_{tot}} \int_{path} B_z ds$$

- ▶ Enerji ölçümleri için magnetik bir spektrometre kullanılmıştır.
- ▶ Çalışma prensibi: magnetik alanı bilinen bir dipolden geçtikten sonra demeti oluşturan parçacıkların momentum dağılımlarının ölçülmesi.
- ▶ Demetin momentum dağılımı bir OTR profil görüntüleyici ya da bölmelendirilmiş bir demet durdurucu ile ölçülebilir.

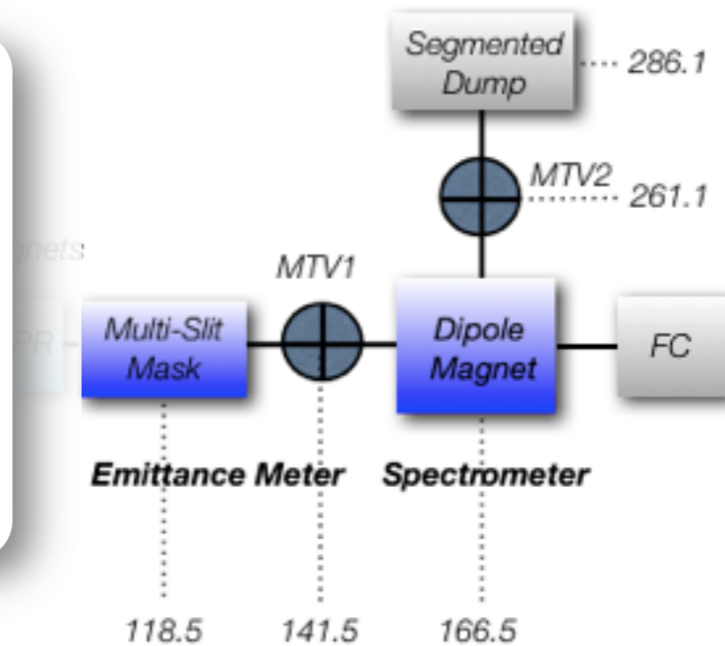
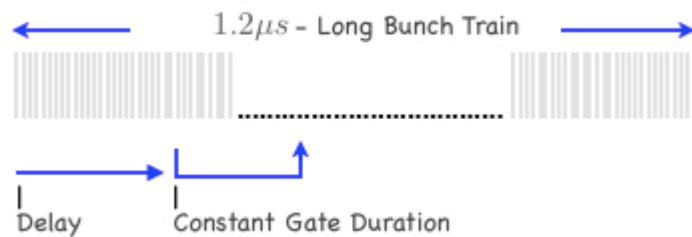


OTR Profil Görüntüleme



- ▶ Yüklü parçacıklar, farklı dielektrik özelliklere sahip iki ortamı ayıran sınırdan geçerken Optik Geçiş Yayınlamı [Optical Transition Radiation] (OTR) yaparlar.
- ▶ OTR demet profilinin ölçümü için bir tanı aleti olarak kullanılır.
- ▶ PHIN üzerinde iki demet yayını ölçer (MTV1) ve spektrometre (MTV2) için iki OTR görüntüleyici bulunmaktadır.
- ▶ OTR **yükseltilmiş-CCD** (ICCD) [Intensified Charge Coupled Device] kameralar yardımıyla ölçülmektedir.
- ▶ Kesitlendirme (gating) özelliğinden dolayı ICCD kameralar zaman-çözünürlüklü ölçümlerde kullanılabilirler.

Zaman-Çözünürlüklü OTR Profil Görüntüleme



Kaynaklar konusu kapsamında:

- ▶ Bir örnek üzerinden düşünelim: CLIC Projesi ve elektron kaynakları
- ▶ Termiyonik (ısı) elektron kaynağı nedir?
- ▶ Foto-injektör (ışıksal elektron kaynağı) nedir ve ısı elektron kaynağına göre üstünlükleri nelerdir?
- ▶ CERN'deki CLIC projesi için PHIN ışıksal elektron kaynağının araştırma ve geliştirme çalışmaları.
 - PHIN foto-enjektörüne giriş
 - Demet özelliklerinin ölçülmesi, ölçüm aletleri, yöntemleri, PHIN'in işletmeye alma sürecinden başlıklar **Bir başka sefere...**

ÖDEV??

- ▶ CCD kamera nasıl çalışır?
- ▶ Yükseltilmiş CCD kameradaki yükseltme basamağının nasıl çalışır?