



HIZLANDIRICI BİLEŞENLERİ

Hatice DURAN YILDIZ
Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü

UKO-2024
12-16 Şubat 2024

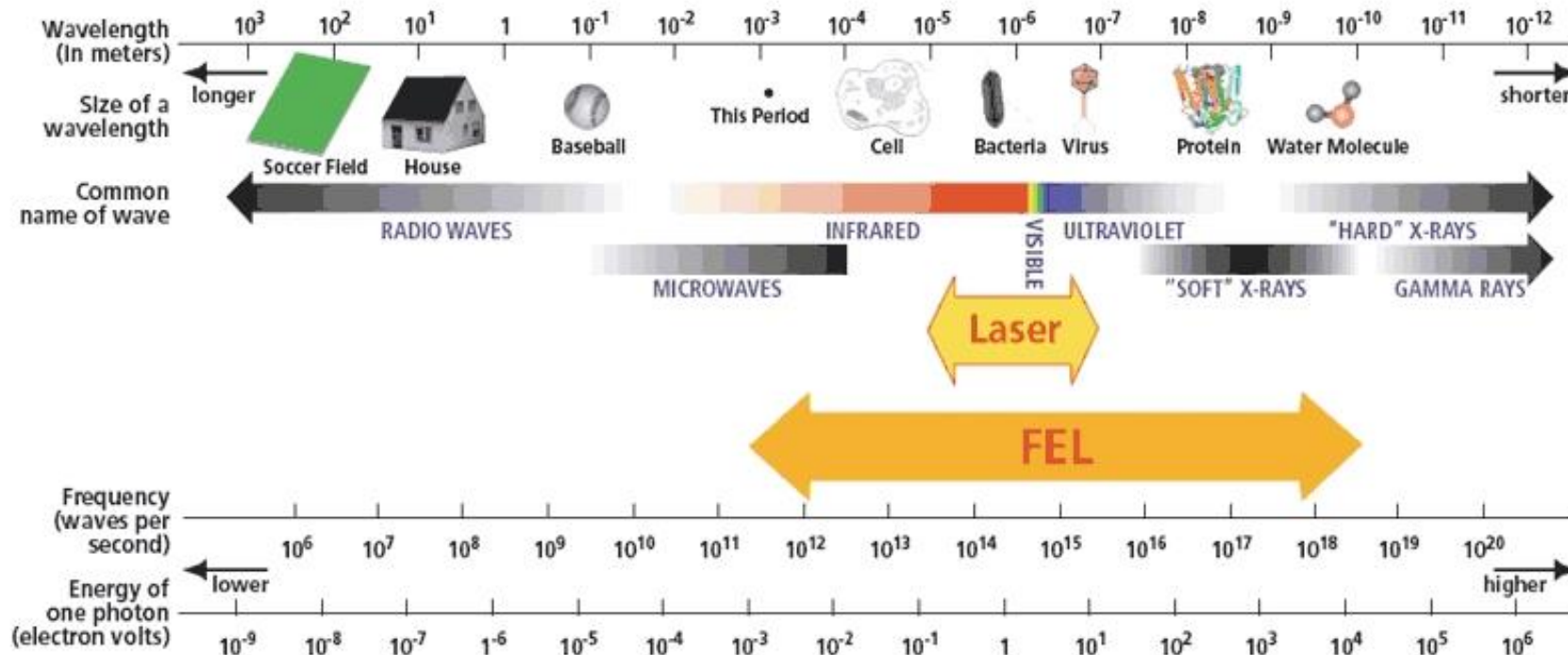
	1. Gün	2. Gün	3. Gün	4. Gün	5. Gün	6. Gün
9:00 - 9:45	9:00 - Kayıt 9:20 - Açılış	CST Anlatım (Çağlar Kaya)	Demet Dinamiği-II (Veli Yıldız)	Parçacıkların Gözlemlenmesinde Hızlandırıcılar ve Dedektörlerin Rolü (İlkay Türk Çakır or Ece Asılar)	Uygulama (Cherenkov ışıması Demeyi) (Ahmet Bingül)	Hızlandırıcı Teknoloji Enstitüsü Tanıtımı (İlkay Türk Çakır)
9:45 - 10:30	Modern Parçacık Fiziğine Giriş (Gökhan Ünel)	CST Anlatım (Çağlar Kaya)	Uygulama 2 (ASTRA) (Veli Yıldız)	Parçacık Madde etkileşmesi (Ahmet Bingül)	Uygulama (Cherenkov ışıması Demeyi) (Ahmet Bingül)	Eğitim, Proje ve Etkinlikler
10:30 - 10:45	Ara					
10:45 - 11:30	Elektrodinamiğe Giriş (Gökhan Ünel)	Uygulama 1 (CST) (Çağlar Kaya)	Uygulama 3 (ASTRA) (Veli Yıldız)	Algıçlar I (Sertaç Öztürk)	Uygulama (Sintilatör Uygulamaları Deneyi) (Sertaç Öztürk)	Yerli Yazılımlar Tanıtım (Demirci, ALOHEP, CutLang, Apricot vd.)
11:30 - 12:15	Hızlandırıcı Tarihçe ve Giriş (Veli Yıldız)	Uygulama 1 (CST) (Çağlar Kaya)	Uygulama 3 (ASTRA) (Veli Yıldız)	Algıçlar II (Sertaç Öztürk)	Uygulama (Sintilatör Uygulamaları Deneyi) (Sertaç Öztürk)	
12:15 - 13:30	Öğle Arası					
13:30 - 14:15	Hızlandırıcı Bileşenleri (Hatice Duran Yıldız)	Uygulama 2 (CST) (Çağlar Kaya)	TENMAK Gezisi	GEANT4 Tanıtımı (Sinan Kuday)	Kozmik Müon deneyi (Veri Değerlendirme) (Burak Bilki)	Ülkemizde hızlandırıcı çalışmaları (Saleh Sultansoy)
14:15 - 15:00	RF Alanlar (Hatice Duran Yıldız)	Uygulama 3 (CST) (Hüseyin Sertaç Sümer)	TENMAK Gezisi	Uygulama (GEANT4) (Sinan Kuday)	Kozmik Müon deneyi (Veri Değerlendirme) (Burak Bilki)	Ülkemizde algıç çalışmaları (Serkant Ali Çetin or İlkay Türk Çakır)
15:00 - 15:15	Ara					
15:15 - 16:00	RF Alan Tasarımı (Superfish) (Ümit Kaya)	Demet Dinamiği-1 (Veli Yıldız)	TENMAK Gezisi	Uygulama (Kozmik Müon deneyi) (Burak Bilki)	TARLA Tesisi?	Katılım Belgelerinin Verilmesi
16:00 - 16:45	Poisson Anlatım ve Uygulama(Poisson) (Ümit Kaya)	Uygulama 1 (ASTRA) (Veli Yıldız)	TENMAK Gezisi	Uygulama (Kozmik Müon deneyi) (Burak Bilki)	TARLA Gezisi?	Kapanış

Neleri hızlandırırız?

Hızlandırıcıları ne için yaparız?

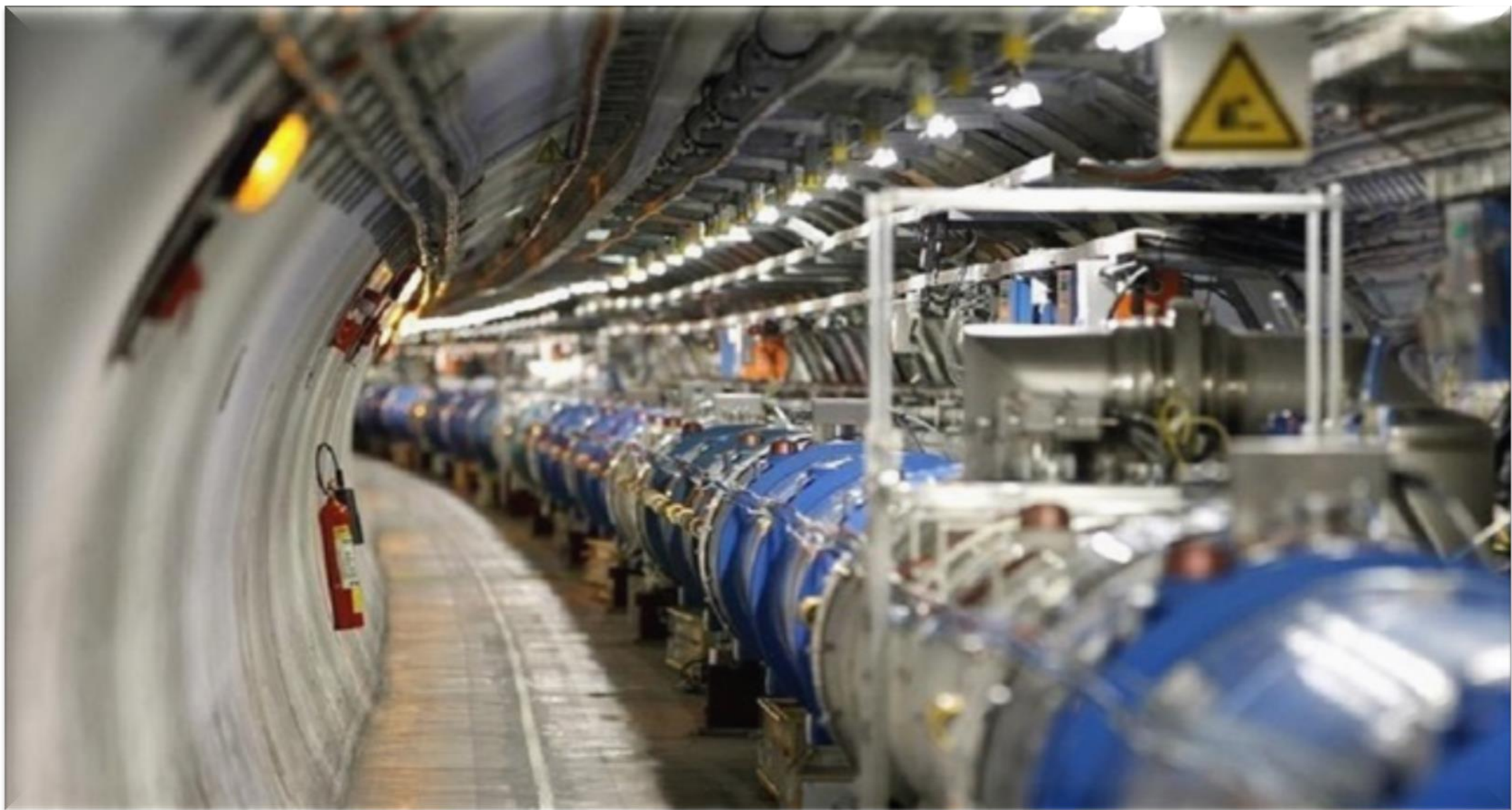
Neden parçacıkları hızlandırıyoruz?

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



<http://htwins.net/scale2/>

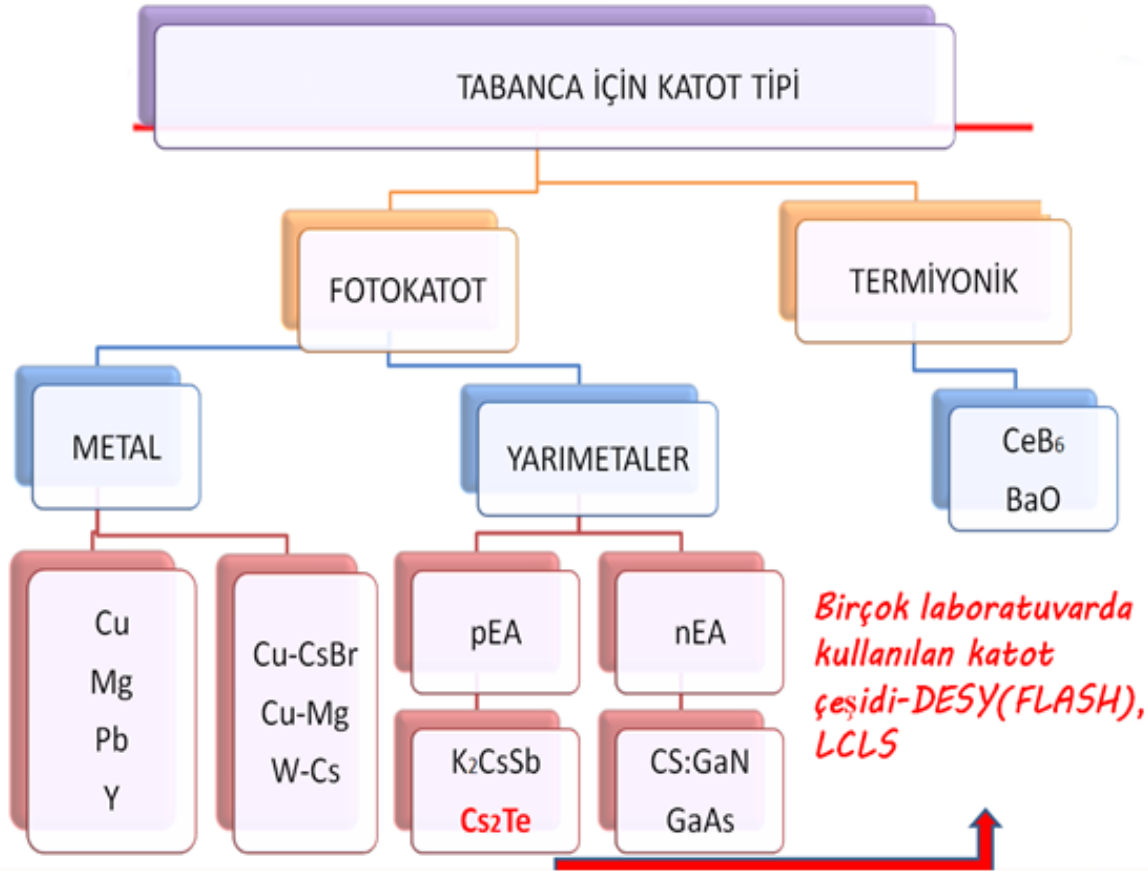
$$E = hf, \quad \lambda f = c$$



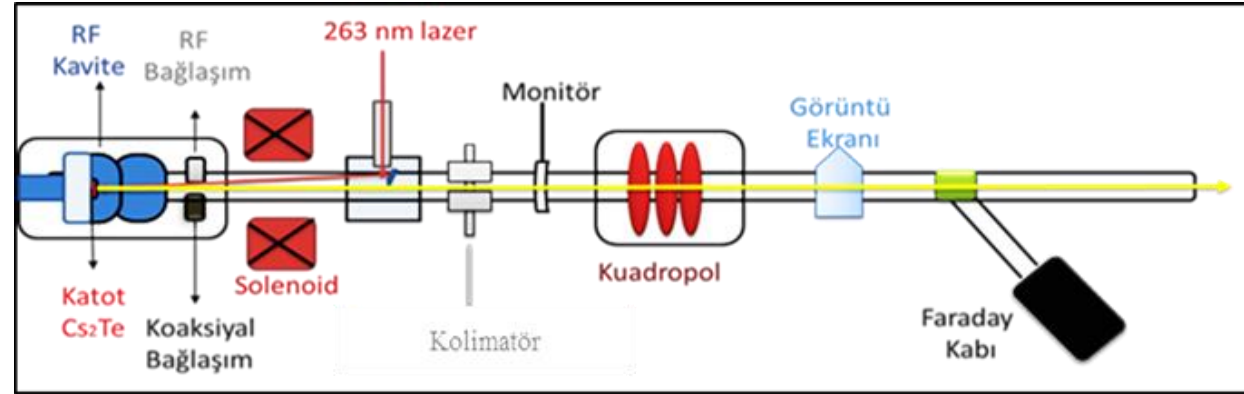
HIZLANDIRICI BİLEŞENLERİ

- Hızlandırıcılarda parçacık kaynakları
- RF Kaviteleler (Kovukları)
- Magnetler
- Demet durdurma sistemleri
- Diagnostik elemanlar
- Ek sistemler (Vakum, Kontrol, Radyasyon, ...)

Parçacık Kaynakları-1

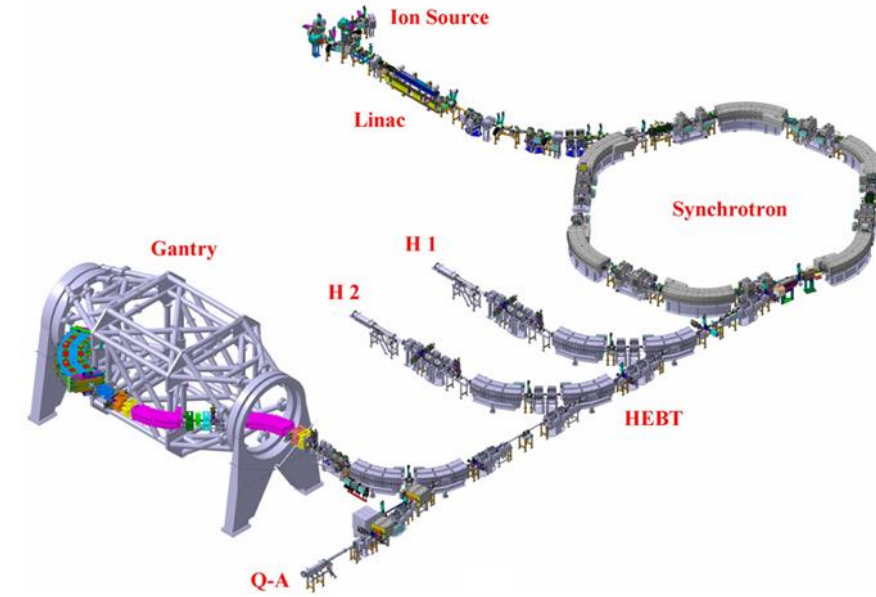
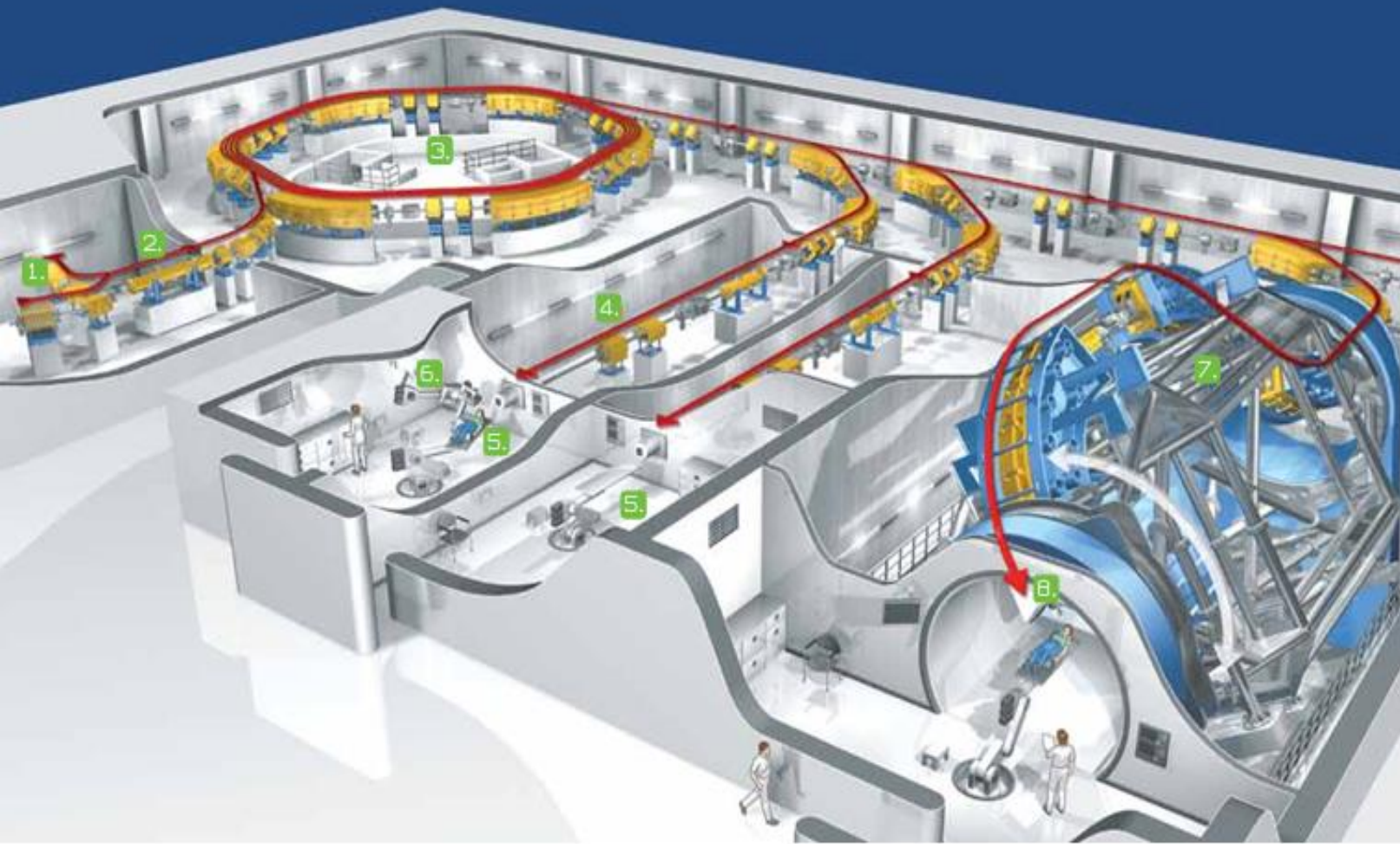


Fotokatot Tipi



Elektron demeti injektör çıkışında 4.5 MeV (1.5-hücre) veya 9.2 MeV (3.5 hücreli) enerjide ve < 2 mm mrad yayınımda elde edilebilir.

Heidelberg Ion Beam Therapy Center (HIT)



Parameter	Steps	Protons	Carbon
Energy	255	48 – 221 MeV/u	88 – 430 MeV/u
Penetration	255	20 - 300 mm	20 - 300 mm
Beam Size	4	8 – 20 mm	4 – 12 mm
Intensity	10	$8 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^9$ 1/s	$2 \cdot 10^6 - 8 \cdot 10^7$ 1/s

1. Pozitif yüklü atomların (iyonların) demetlerinin üretildiği yer burasıdır. Proton elde etmek için hidrojen gazı kullanılırken, karbon iyonları için karbondioksit kullanılır.

İki aşamalı doğrusal hızlandırıcı: İyonlar ışık hızının %12'sine kadar hızlandırılır.

3. Sinkrotron: Altı adet 60° mıknatıs, iyon demetlerini dairesel bir yola doğru bükür.

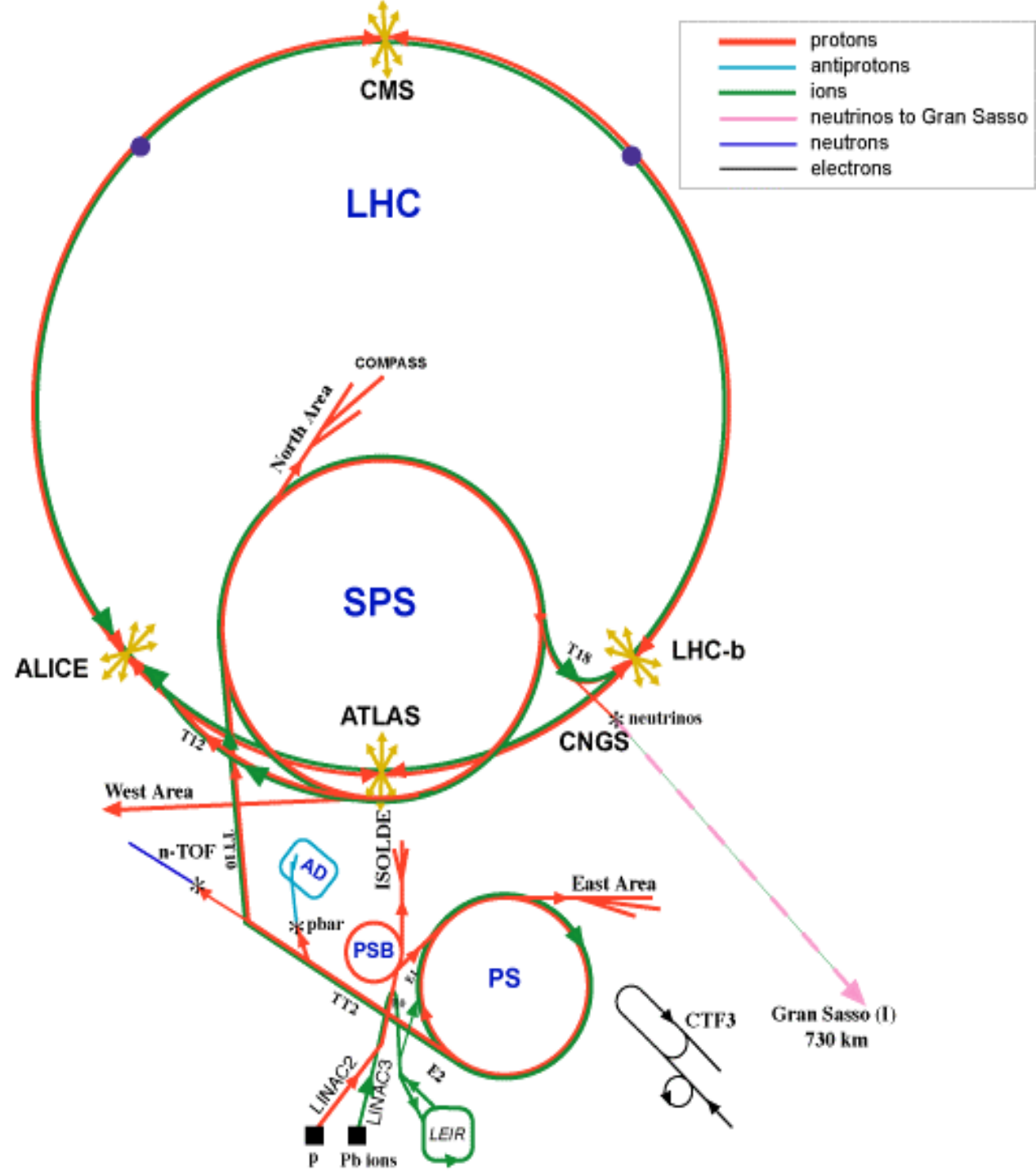
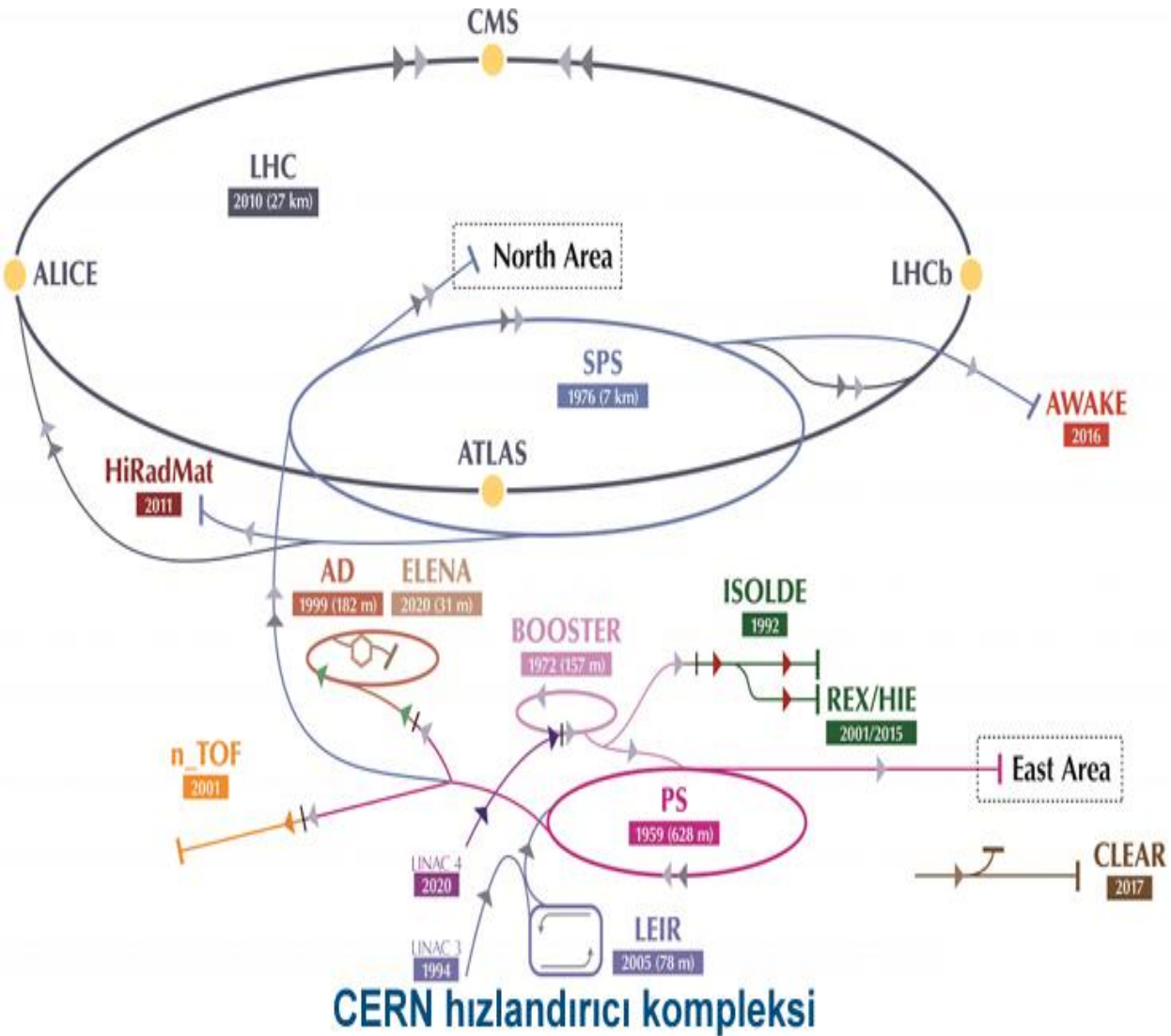
Yörünge boyunca iyonlar ışık hızının %75'ine kadar hızlandırılır.

5, 6, 7. Tedavi odaları: Mıknatıslar, demeti vakum tüplerinde yönlendirir ve odaklar.

İyon kaynağı çeşitleri

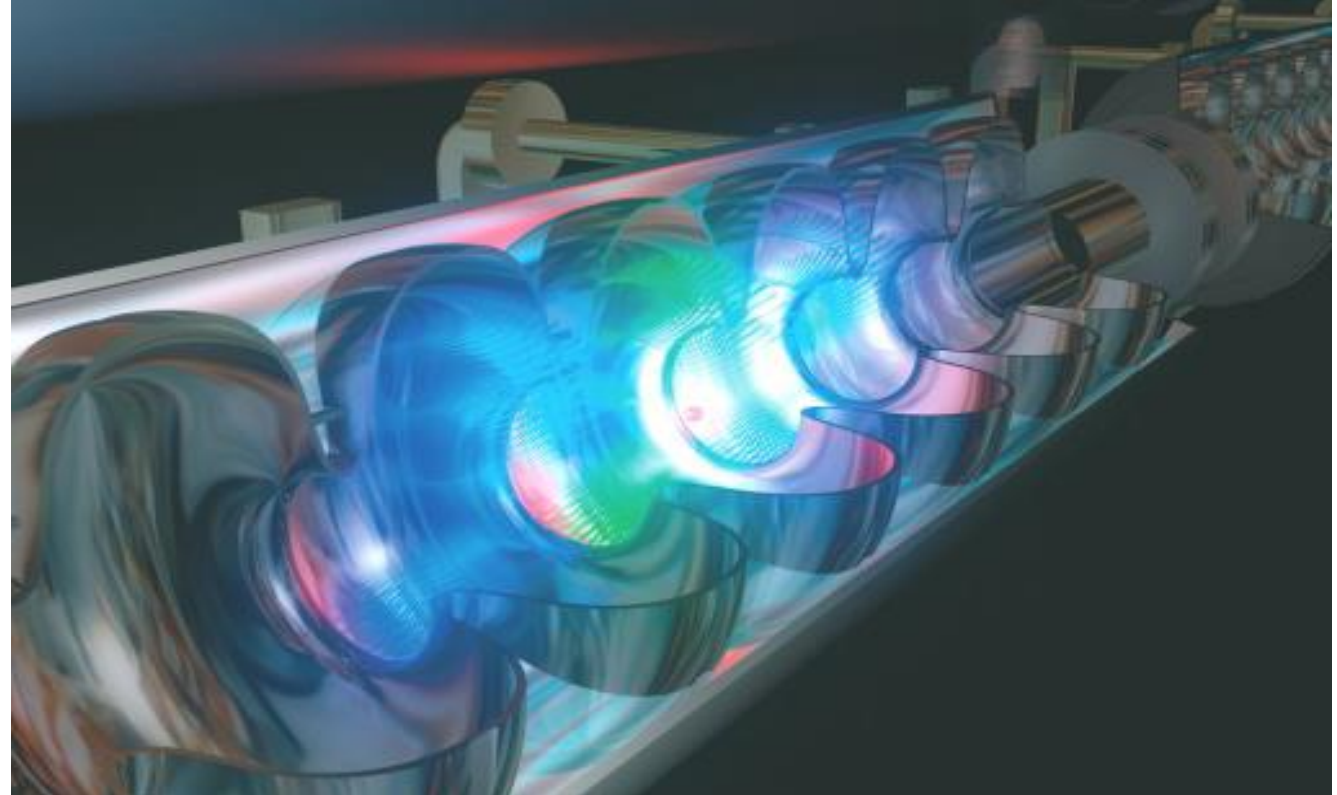
- Duoplasmatron
- Electron beam ion source (EBIS)
- Laser ion source (LIS)
- RF ion sources
- Metal vapor vacuum arc ion source (MEVVA)
- Liquid metal ion sources
- Sources for negative ions ...

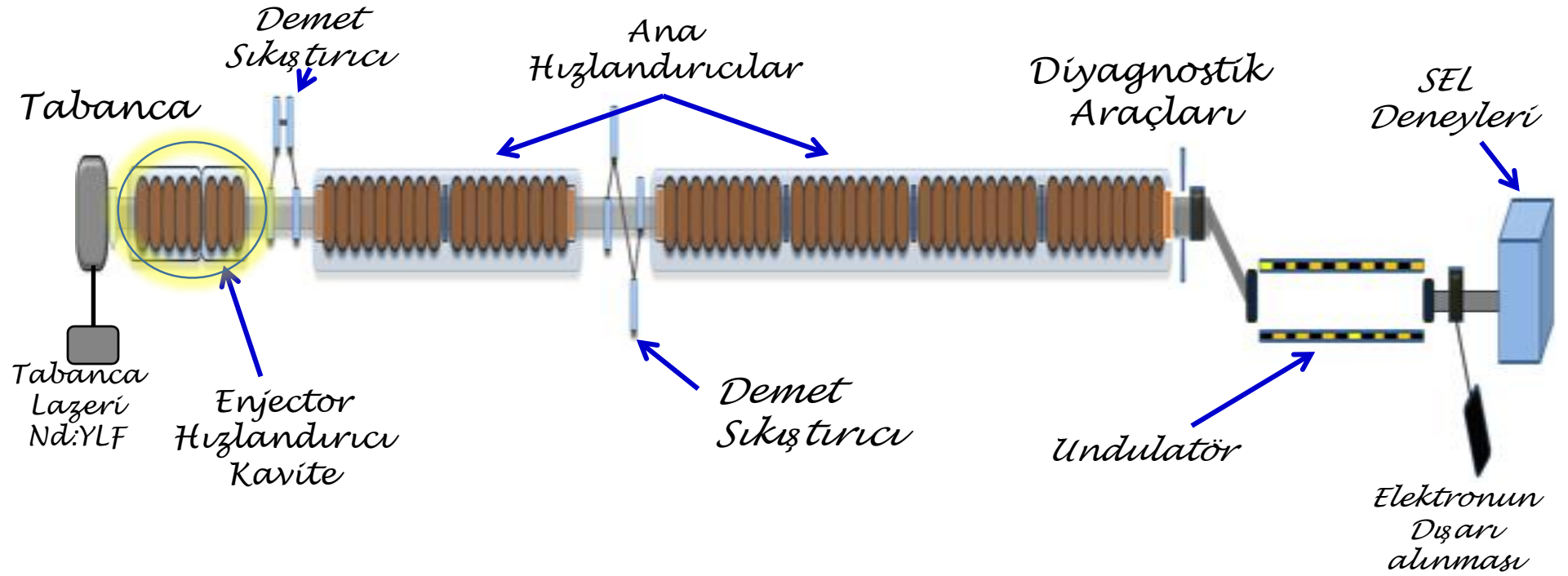
Parçacık Kaynakları-3



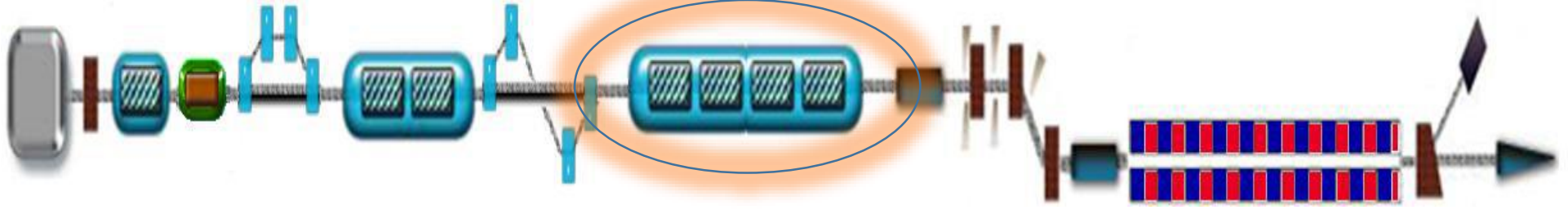
Parçacık Kaynakları-3

- Yüksek Kuantum verimliliği (QE): $QE = N(E)/N(f)$
- Düşük yayınım (emittans)
- İş Fonksiyonu (Richardson-Dushman), akım yoğunluğu: $J = A_G T^2 e^{\frac{-W}{kT}}$
- Uzun Ömür
- Dayanıklılık
- İşletim kolaylığı
- Düşük karanlık akım
- Hızlı tepki zamanı
- Spektral tepki
- Vakum kirlenme hassasiyeti
- Termal stabilite

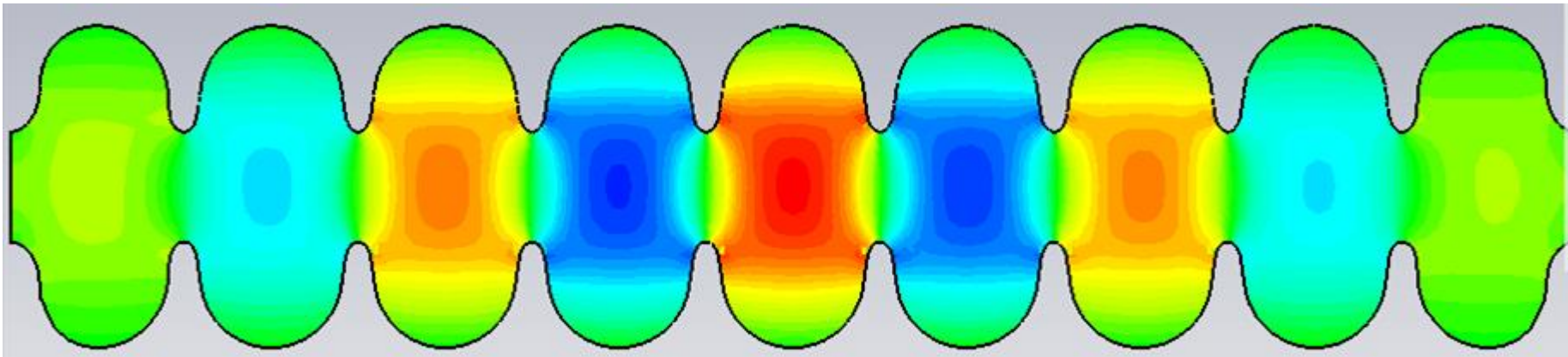
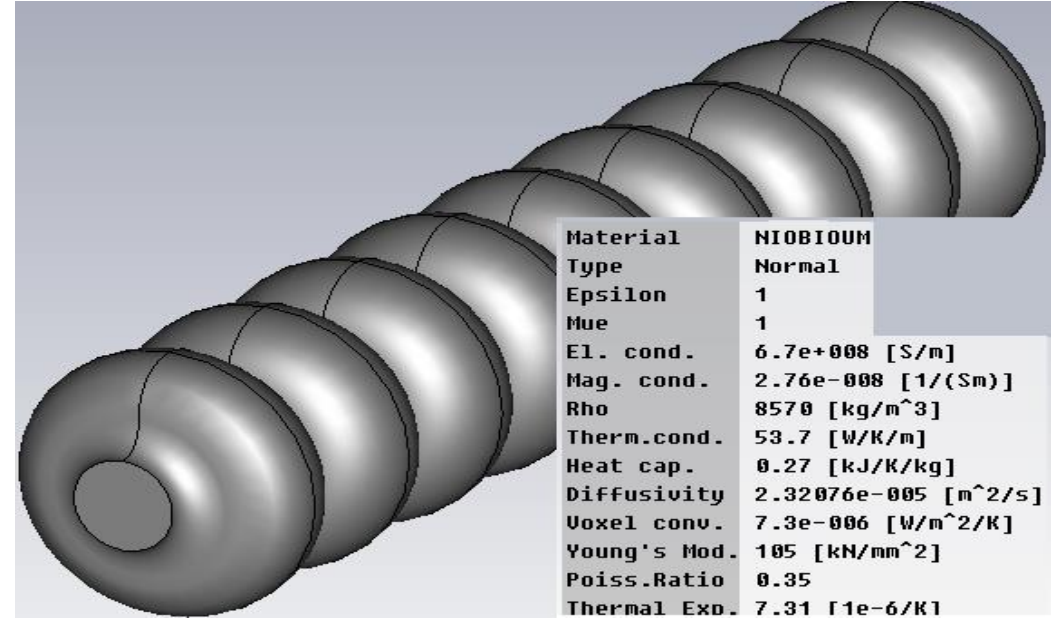




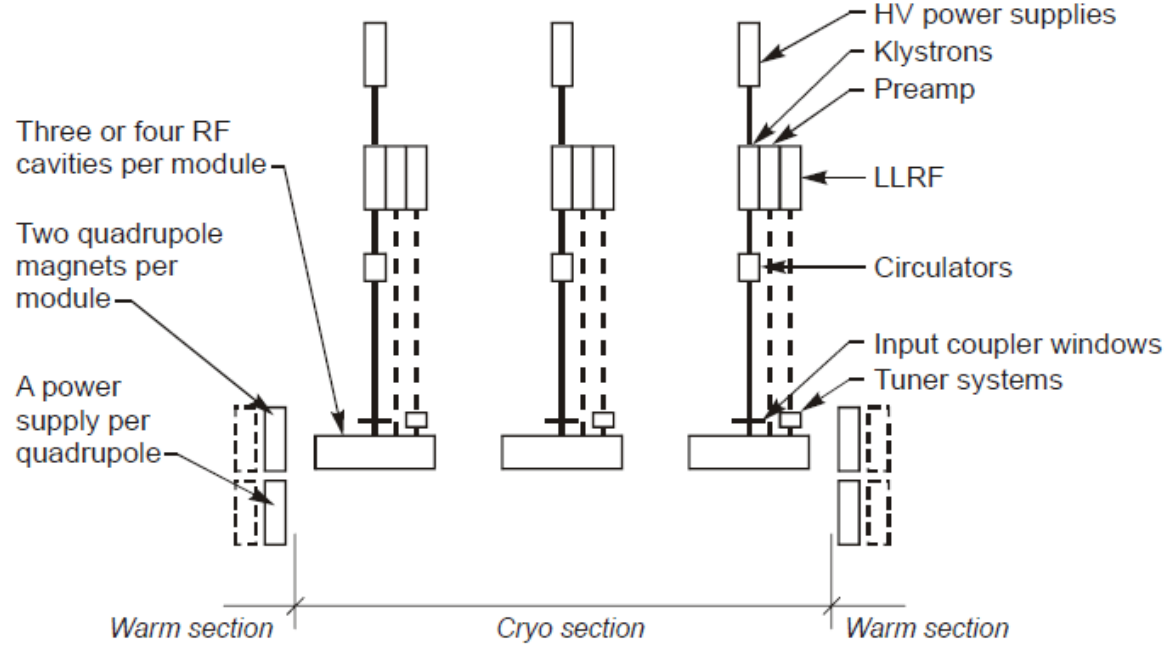
- Vakum Soğutma,
- Elektrik kabloları ve bağlantıları,
- Su Soğutma,
- Kontrol Sistemi,
- Radyasyon Güvenliği
- Foton Diyagnostik Sistemleri,
- ...



9 hücrelik süper iletken kavite içinde elektrik alan dağılımı



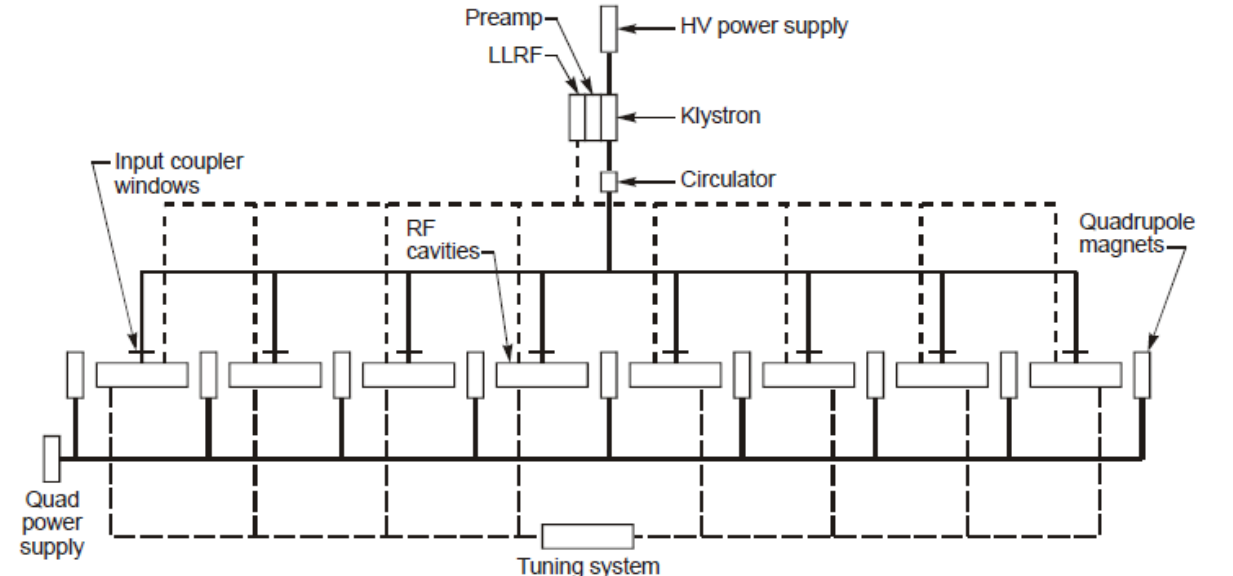
RF Kaviteler



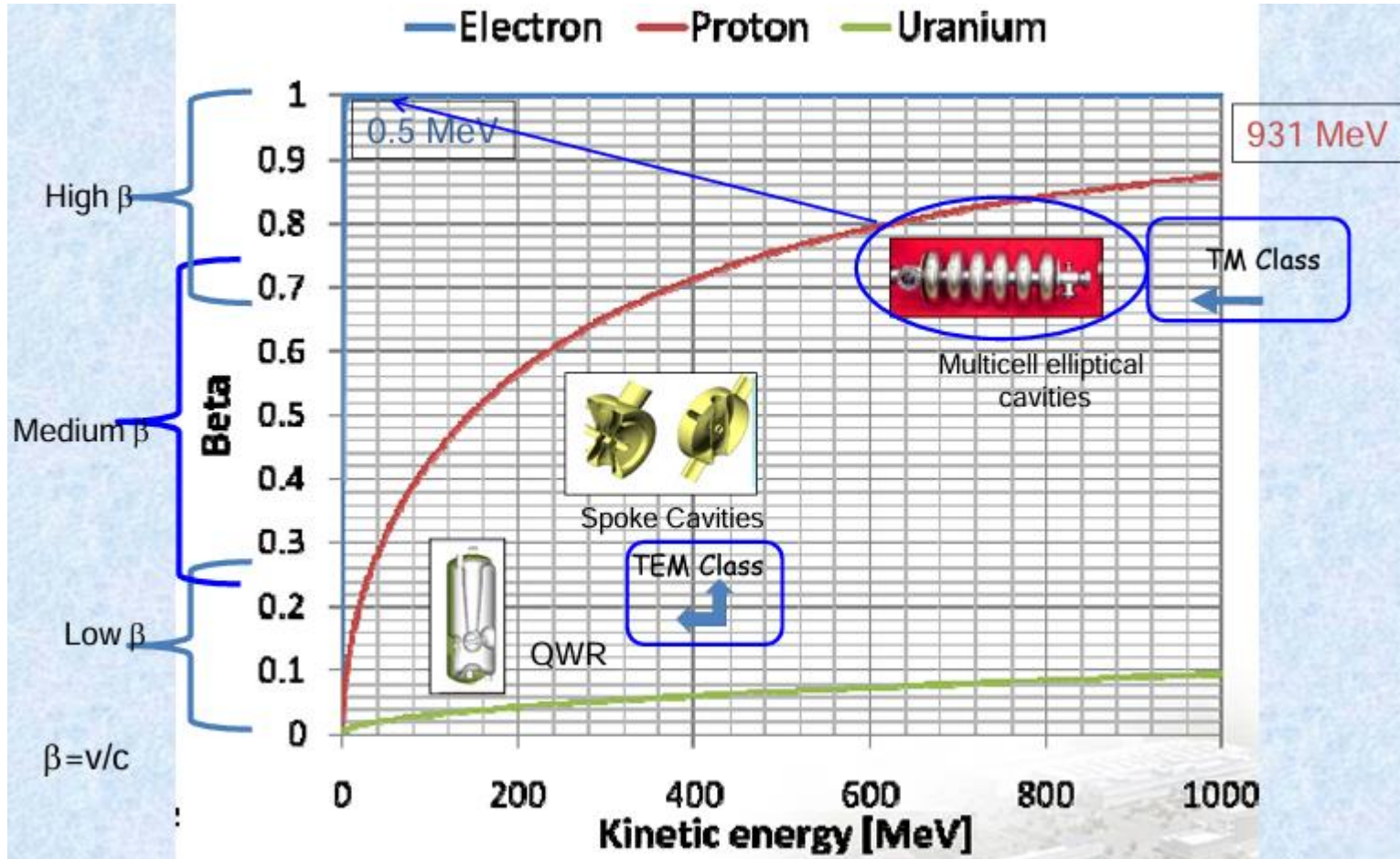
Süperiletken kavite ve aksamı

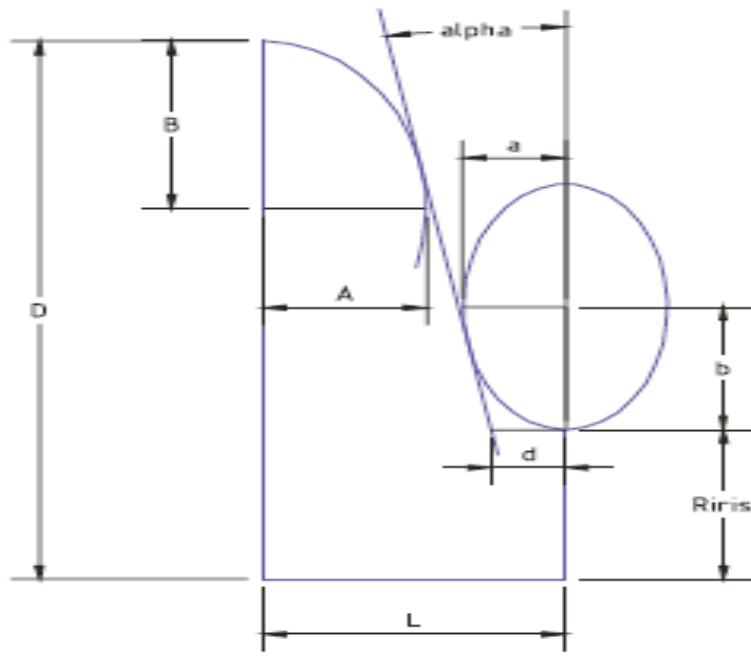
Kovuklar ayrıca
Silindirik (Pillbox) kavite,
Tekerlek (spoke) kavite,
Çeyrek-dalga rezonatör (Quarter-Wave Resonator),
Eliptik (elliptically) kavite şeklinde farklı yapılarda olabilir

Normaliletken kavite yapısı ve aksamı



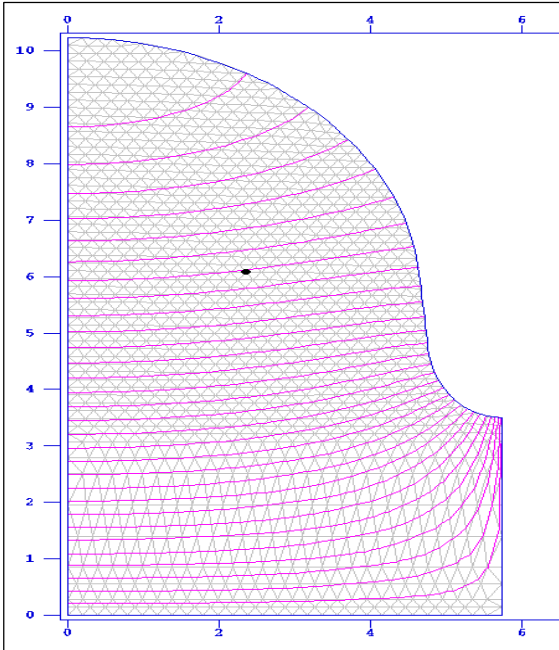
Farklı β değerlerinde farklı kavite geometri yapıları baskın olur.





Kavite geometrisini belirleyen parametreler ve bu parametrelerin kavite üzerindeki etkileri;

1. Kavite hücre uzunluğu L ; demet eksenini boyunca yatay kavite uzunluğudur ve hızlandırılan parçacığın hızına ve kavite içerisindeki alanın dalga boyuna bağlı olarak $L = \beta\lambda/2$ olarak hesaplanır.
2. İris yarıçapı R_{iris} ; çok hücreli kavitelere hücre-hücre bağlaşım (cell-to-cell coupling) ve hücre demet tüpü bağlaşımına (cell-beam tube coupling) göre belirlenir.
3. Yan duvar açısı α ; iris elipsi düzlemi ile yan duvar arasında kalan açıdır ve kavite duvarları üzerinde özellikle elektrik alan ve manyetik alanın pik değerlerinin belirlenmesinde etkilidir.
4. İris elips yarıçapları oranı a/b ; Kavite duvarı üzerinde pik elektrik değerlerini belirleyen parametrelerden biridir.
5. Ekvator elips yarıçapları oranı A/B : Bu oran RF parametrelerine etkisi olmasa da kavitenin mekanik dizaynında etkilidir.
6. Hücre yarıçapı R_{eq} : Herhangi bir elektromanyetik alan ve mekanik bir parametreyi değiştirmeden kavite içerisinde frekans ayarı yapmaya olanak sağlamaktadır.



Kavite karakterizasyon parametreleri

Kalite faktörü (Q): Hızlandırıcı kavite, EM enerjiyi depolayan ve yüklü parçacık demeti ile bu enerjiyi paylaşan veya alan mikrodalga rezonatörleridir. Depolanan EM enerji kavite içerisinde rezonatörün yapıldığı metalde dağılma ve rezonatör duvarındaki açıklıklar (bağlaşım kuplörü) yoluyla yayılıma uğrar. Her iki sürecin de ölçüleri sırasıyla iç (Q_0) ve dış (Q_{ext}) kalite faktörleri ile belirlenmektedir. Dış kalite faktörü, bireysel açıklıklar için tanımlanmıştır. Hacmi V , metal yüzey alanı S olan bir kavite için ($\omega = 2\pi f$) iç ve dış kalite faktörü:

$$Q_0 = \frac{\omega U}{P_c} \Rightarrow Q_0 = \frac{\omega \int_V |E|^2 dV}{\frac{R_s}{2} \int_S |H|^2 ds}, \quad Q_{ext} = \frac{\omega U}{P_{rad}} \Rightarrow Q_{ext} = \frac{\omega \int_V |E|^2 dV}{\frac{1}{2} \int_{S_{prt}} |E|^2 ds}$$

Kavite içerisinde depo edilen enerji U : $U = \frac{1}{2} \mu \int_V |H|^2 dV = \frac{1}{2} \epsilon \int_V |E|^2 dV$

SC kavite yapılarında yüzey direnci : $R_s(f, T) = R_{res} + R_{BCS} = R_{res} + 0.0002 \cdot \frac{1}{T} \cdot \left(\frac{f[GHz]}{1.5}\right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{1.76Tc}{T}\right)$

Rezidüel direnç R_{res} , sıcaklık T 'ye karşı sabittir ve süper iletkenin saflığı, pürüzlülük, oksidasyon gibi yüzey safsızlıklarının ölçüsüdür, yüzey ne kadar temizse rezidüel direnç o kadar düşüktür. R_{BCS} (Bardeen–Cooper–Schreiffer), frekansla ($\sim f^2$) ile artarken, T ile üstel olarak azalmaktadır.

Geometrik Faktör G : Geometrik faktör, depolanan enerji ile H^2 yüzey integralinin oranıdır. Değeri, birim yüzey direnci $R_s = 1\Omega$ için iç kalite faktörü Q_0 'a eşittir ve aynı yüzey direnci için Q_0 'a göre çeşitli rezonatör geometrileri ile doğrudan bir karşılaştırma sağlar. Daha yüksek geometrik faktör, aynı yüzey “kalitesi” için daha yüksek iç kalite faktörü ve daha düşük enerji dağılımı anlamına gelir. SC hızlandırıcı kavite, çalıştırılmasında önemli bir parametre olarak geometrik faktörün genellikle belirli bir değer aralığında sabit olması beklenir

$$G = \frac{\omega \cdot U}{\frac{1}{2} \int_S |H|^2 ds} = \frac{\omega \cdot U \cdot R_s}{P_c} = Q_0 R_s$$

Karakteristik demet empedansı: EM enerji (U) depolanan bir kavitede yüklü bir parçacık, enerjisini değiştiren kuvvete maruz kalır. Parçacığın enerjisi uygulanan voltajla doğru orantılı olarak $\Delta E = qV$ değişir. Hızlandırıcı voltajı V, parçacık yörüngesi boyunca teğetsel elektrik alanın integralidir. L uzunluğundaki bir hızlandırıcı kavite içerisinde ω frekansı ile değişen alan içinde hareket eden βc hızındaki parçacıklara etkiyen hızlandırıcı voltajı,

$$V_{acc} = \frac{1}{q} \int_{-\infty}^{\infty} q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) ds = \left| \int_0^L E_Z(r=0, z) e^{ikz} dz \right| = E_0 L T$$

burada T geçiş süresi faktörüdür. Bu faktör parçacığın bir kavite hücresinde, sonlu hızı hesaba katılarak kaviteyi geçiş süresidir. Diğer bir değişle RF alanın zamanla değişim periyodudur ve parçacıkların hızına bağlıdır, T hızlandırıcı voltajının normalize edilmesinde kullanılır

$$T = \frac{|V_{acc}|}{\int_{-\infty}^{\infty} |E_Z(r=0, z)| dz}$$

Shunt Empedans R/Q: Hızlandırıcı voltajın karesiyle (Normalize elektrik alanın karesiyle) orantılı olduğundan, hızlandırıcı voltajı uygun şekilde normalleştirmek için kullanılabilir. Kavitede depolanan enerjinin ivmeye ne kadar etkili bir şekilde dönüştürüldüğünün ölçüsüdür. R/Q kavitede kayıp mekanizması tarafından değil, benzersiz olarak boşluğun geometrisi tarafından belirlenen bir parametredir. SC CW yapılarda kavite duvarlarında RF gücünün dağılımının fazla olmasından kaynaklı hızlandırıcı yapıda kriyojenik yük fazlalığı mevcuttur. Bu nedenle dizayn edilen kavitelerin optimizasyonlarında shunt empedans değerinin yüksek tutulması gerekir.

$$R/Q = \frac{|V_{acc}|^2}{2\omega U}$$

Tepe elektrik alanının ve tepe manyetik alanının hızlandırıcı gradyentine oranları (η_E, η_B): Bir hızlandırıcı kavitede depo edilen enerji U_{acc} ve kavite aktif uzunluğu L_{act} olmak

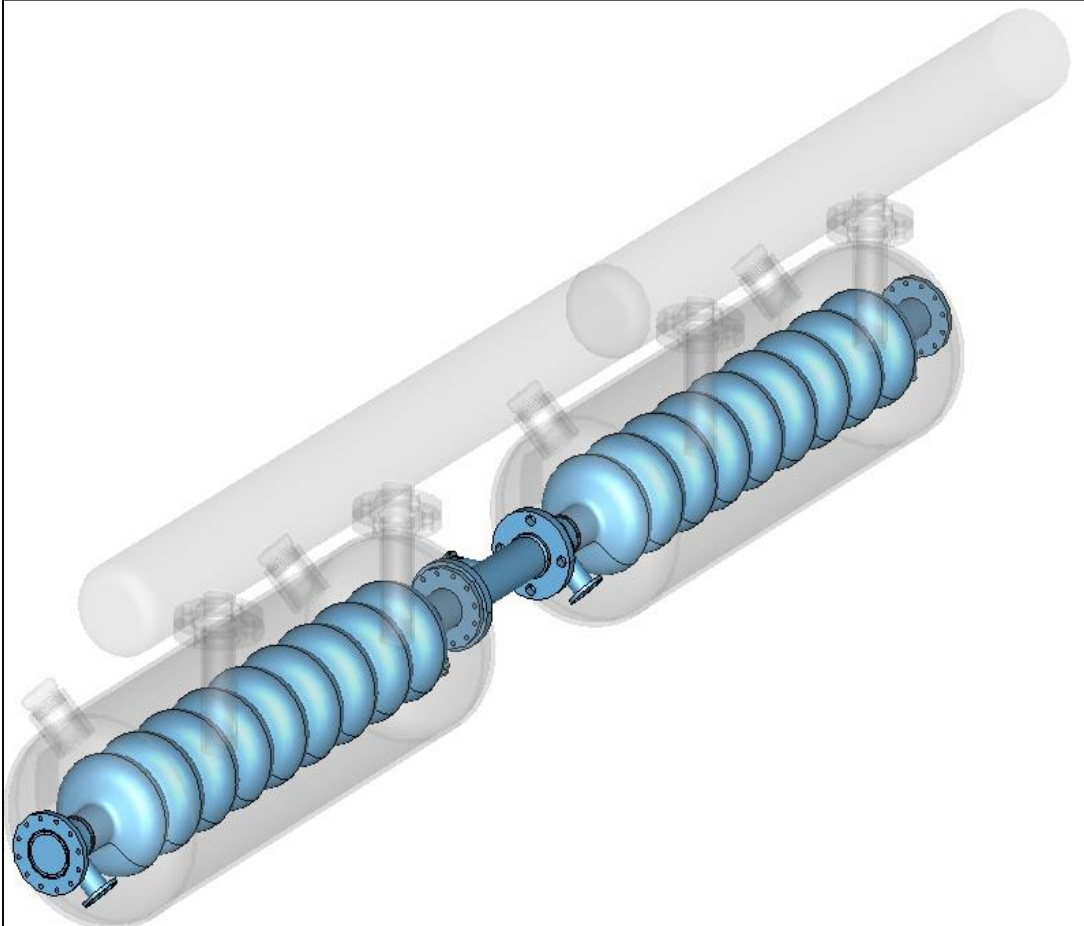
üzere kavite maksimum elektrik gradyenti, $E_{acc} = \frac{\sqrt{\omega_{acc} \cdot U_{acc} \cdot (\frac{R}{Q})_{acc}}}{L_{act}}$ şeklinde hesaplanır ve kavite metal yüzeyindeki tepe elektrik alan E_{pk} 'in hızlandırıcı gradyenti E_{acc} 'ye oranı $\eta_E =$

E_{pk}/E_{acc} ile verilir. Benzer şekilde kavite duvarındaki maksimum manyetik alanın B_{pk} 'in oranı ise $\eta_B = B_{pk}/E_{acc}$ şeklinde ifade edilir. En uygun optimizasyon değerleri $E_{pk}/E_{acc} = 2 \dots 2.6$ iken $H_{pk}/E_{acc} = 40 \dots 50$ Oe/(MV/m) aralığında belirlenmiştir.

Hücre-hücre bağlaşım faktörü (k_{cc}): Çok hücreli kaviteelerde hücre bağlaşım katsayısı, k_{cc} , önemli bir faktördür. Bağlaşım katsayısı mekanik olarak değişen bir parametredir. İki hücreli kavite referans alındığında kavite hücrelerinin frekans farklılığına yani modlarına bağlılığından k_{cc} elde edilir.

$$k_{cc} = 2 \frac{f_{\pi} - f_0}{f_{\pi} + f_0} 100\%$$

Örnek bir hızlandırıcı hattında genel olarak her modülde 2 adet 9-hücrelik ana hızlandırıcı kavite yer alabilir. Toplamda 68 modül, bunların çalıştırılma aksamaları ve her modül arasında odaklayıcı kuadropol magnet çiftleri, belirli aralıklarla yerleştirilen akım ölçer sistemler ve demet monitörleri sistemin ana bileşenlerini oluşturmaktadır. Konumlandırma işlemleri, hızlandırıcı alt sistemleri (vakum, soğutma vb.) ile demet optimizasyon bileşenleri (magnet, demet monitörleri vb.) göz önünde bulundurularak belirli aralıklar verilerek yapılabilir.



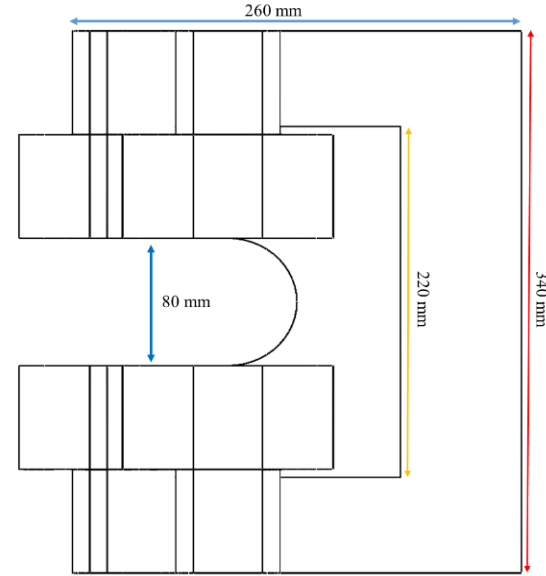
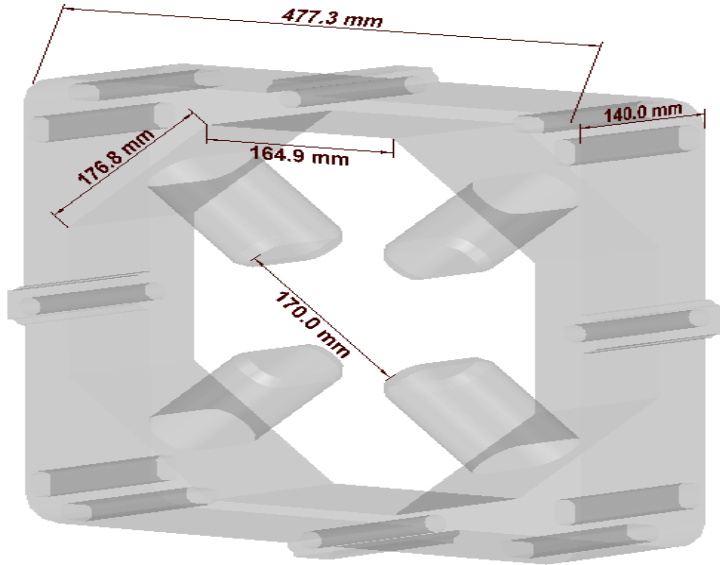
Sistem Bileşeni x adet	Kavite	Selenoid	Kuadropol	Dipol	Modül	Demet kesici	Vakum valf	Kolimatör
Enjektör Hattı	1.6-hücre x1	1	2	1	-	2	2	1 &1
Ana hat	9-hücre x 138	4	40	4	68	20	138	20 &20

RF ve Kavite
parametreleri

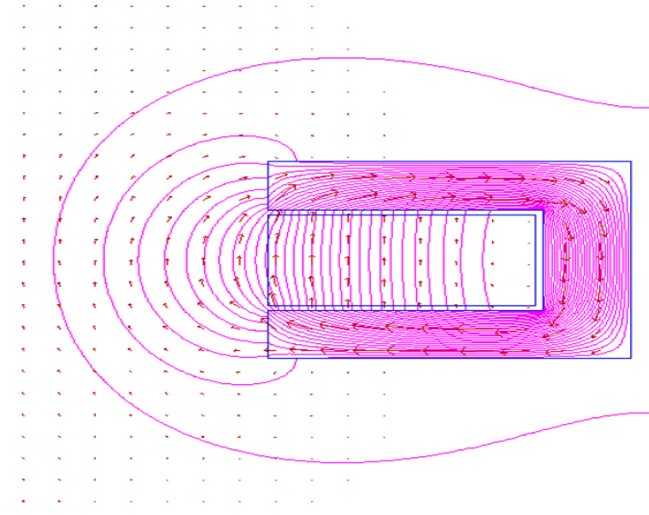
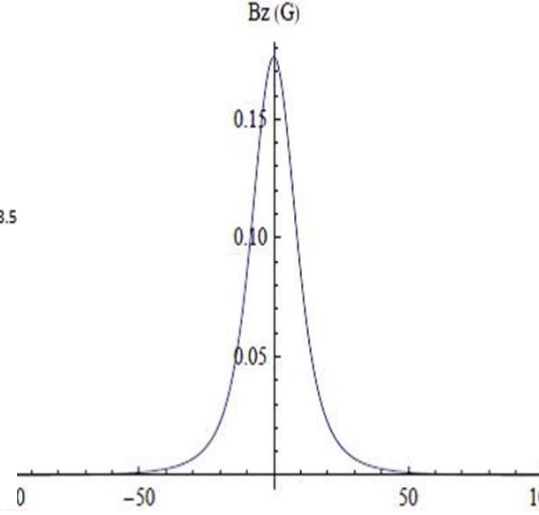
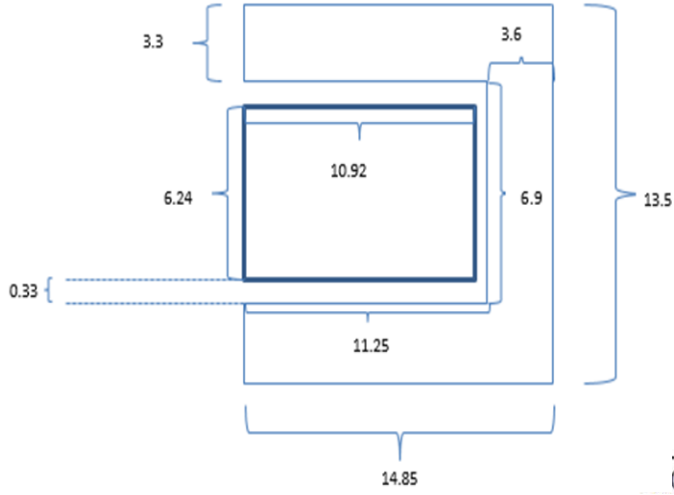
Parameters	Units	Superfish/Poisson Results			
		1.4-cell	1.5-cell	1.6-cell	1.8-cell
Frequency (f)	GHz	1299.64617	1299.95856	1299.54137	1299.99979
Acceleration Gradient (E_{acc})	MV/m	16.03	16.50	16.70	15.50
Max. Electric Field (E_{pk})	MV/m	36.6794	37.7489	38.437	32.6734
Max. Magnetic Field (H_{pk})	A/m	63076.7	60891.1	57242.7	52009.0
	mT	84.058	79.126	60.616	70.899
Stored Energy (U)	J	5.7712455	5.8032916	5.84136	5.0755793
Power Loss (P_c)	W	6.4380769	6.0453060	5.6737552	4.8030071
Transient Time Factor (T)	-	0.6931063	0.7197646	0.7371016	0.7559047
Quality Factor (Q)	-	7.32012×10^9	7.84089×10^9	8.40646×10^9	8.63168×10^9
Surface Resistance (R_s)	n Ω	26.7870	26.7950	26.7842	26.7961
Geometric Factor ($G=R_s \cdot Q$)	Ω	196.084	210.097	225.161	231.295
R/Q	Ω	143.267	166.393	194.493	228.042
k_{cc} (%)		1.88575	1.66816	1.62996	1.32847
E_{pk}/E_{acc}	-	2.2882	2.2878	2.3016	2.1080
H_{pk}/E_{acc}	mT/MV/m	2.1610	2.0270	1.8715	2.0003
Wake Loss	V/pC	0.29248	0.33977	0.39702	0.46567
Parameters	Units	CST MWS Results			
		1.4-cell	1.5-cell	1.6-cell	1.8-cell
Frequency (f)	MHz	1299.23789	1299.81099	1299.34889	1299.60733
Acceleration Gradient (E_{acc})	MV/m	16.03	16.52	16.75	15.46
Max. Electric Field (E_{pk})	MV/m	36.69	37.78	38.52	32.5
Max. Magnetic Field (H_{pk})	A/m	67032	63099	57242.7	56539
	mT	84.058	79.126	71.782	70.899
Stored Energy (U)	J	6.598	5.208	5.266	4.388
Power Loss (P_c)	W	5.762	5.616	5.296	4.232
Quality Factor (Q)	-	7.129×10^9	7.574×10^9	8.118×10^9	8.462×10^9
Surface Resistance (R_s)	n Ω	26.78	26.78	26.78	26.78
Geometric Factor ($G=R_s \cdot Q$)	Ω	190.91	202.282	217.395	226.61
R/Q	Ω	144.11	167.119	195.063	221.07
k_{cc} (%)		1,90495	1,66376	1,70441	1,40141
E_{pk}/E_{acc}	-	2.289	2.286	2.299	2.099
H_{pk}/E_{acc}	mT/MV/m	2.2910	2.0943	1.97	2.183
Wake Loss	V/pC	0.2108	0.3299	0.3652	0.3982

HIZLANDIRICI YAPILARDA MAGNETLER (SELENOİD, QUADRAPOL, DİPOL)

Demet içerisindeki elektronları sıkıştırarak kompakt bir yapı haline getirme işlemi ise hızlandırıcı modeline bağlı olarak dizayn edilen selenoid, sterer veya kuadrupol magnetler tarafından yapılır. Bunlar modellenirken elektron demetlerinin sıkıştırılması için Superfish/Poisson programı ve CST programları kullanılabilir, yanda bir selenoid modellemesi görülmektedir.



SOLENOID TASARIMI

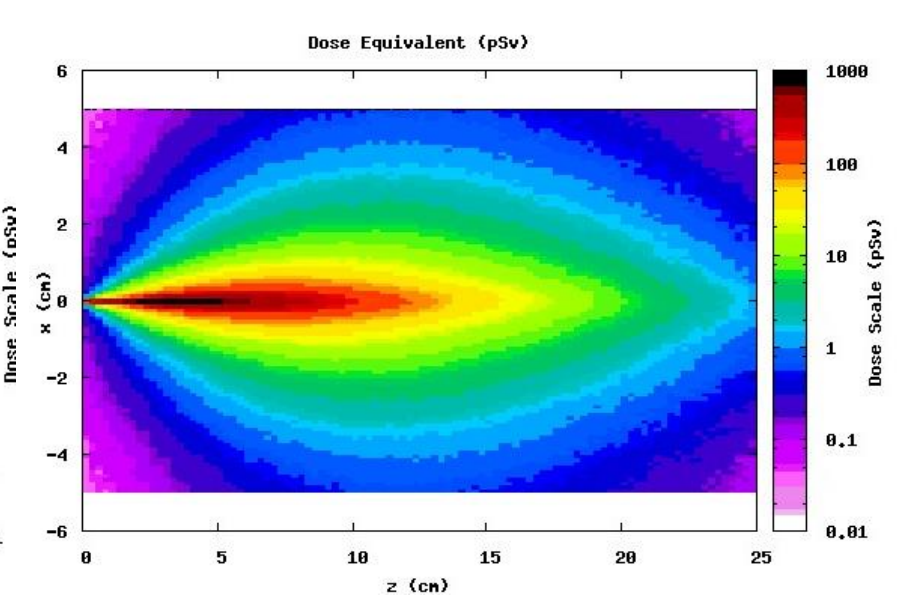
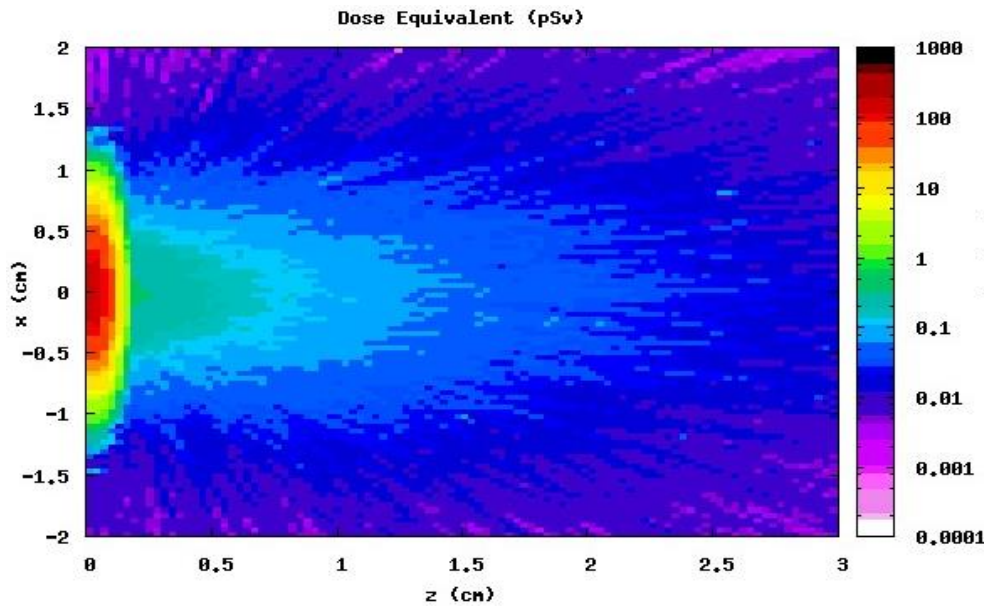
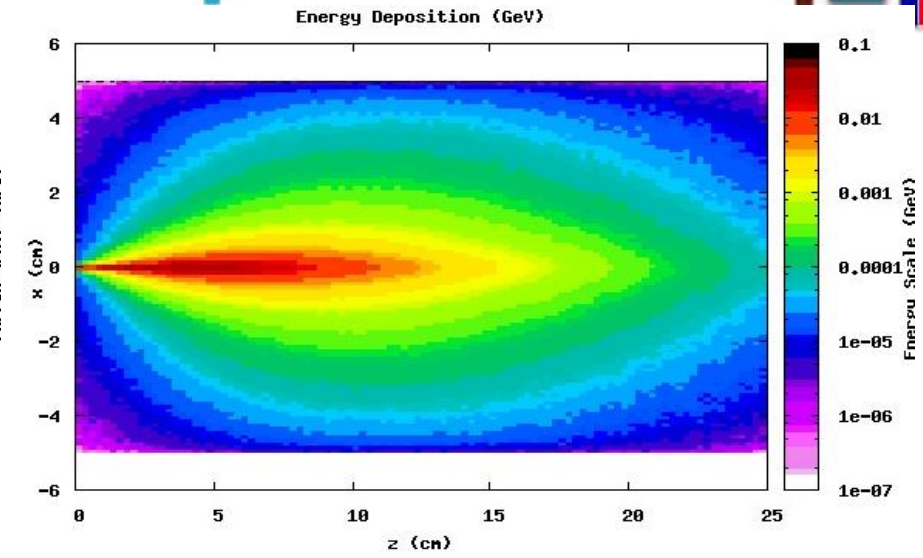
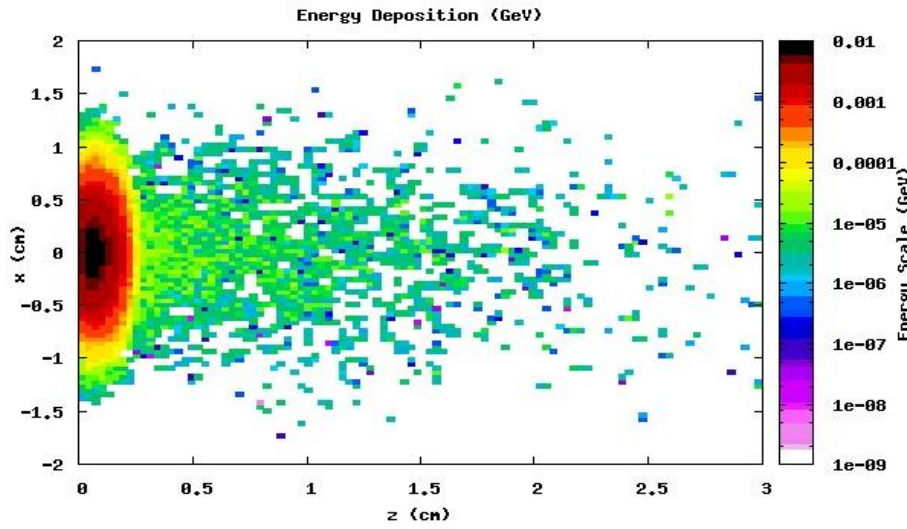
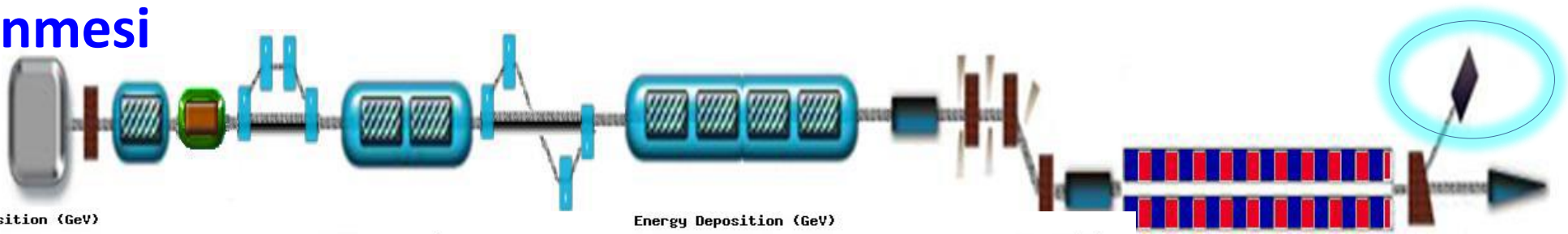


Material of solenoid	Fe&Cu	
Current of solenoid (A)	108	
Magnetic field (T)	0.15	
Position (from cathode) (cm)	40	75
Position length (From cavity)(cm)	23.53 (1.5 cell cavity)	35.45 (3.5 cell cavity)
Active length (cm)	14.85 horizontal	13.5 verticle

Kompka demet elde etmek için tabanca kavitenin bitimine uzaklığı ve magnet şiddeti optimize edilen şekilde solenoid yerleştiriyoruz.

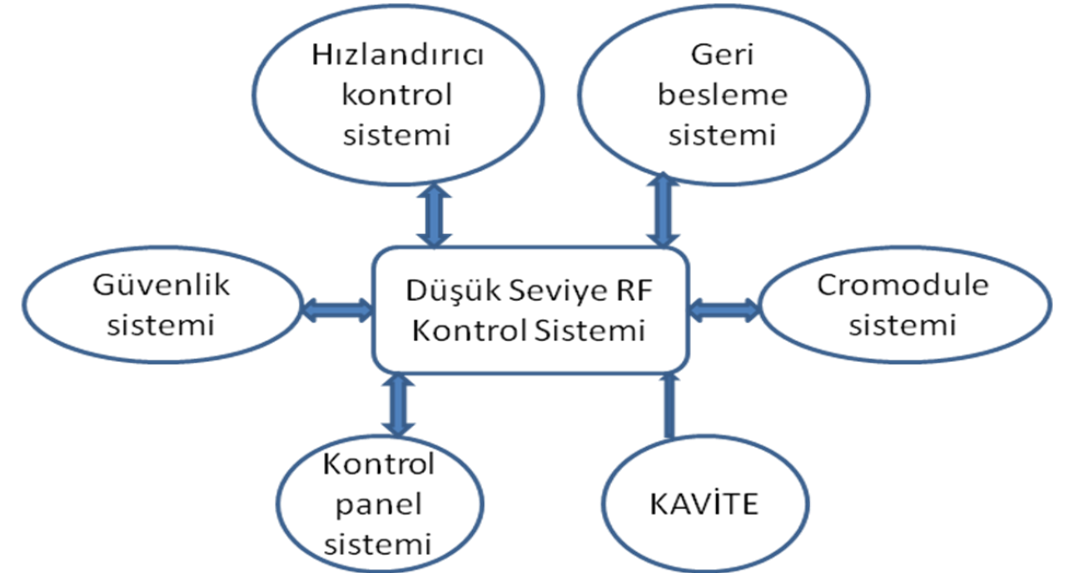
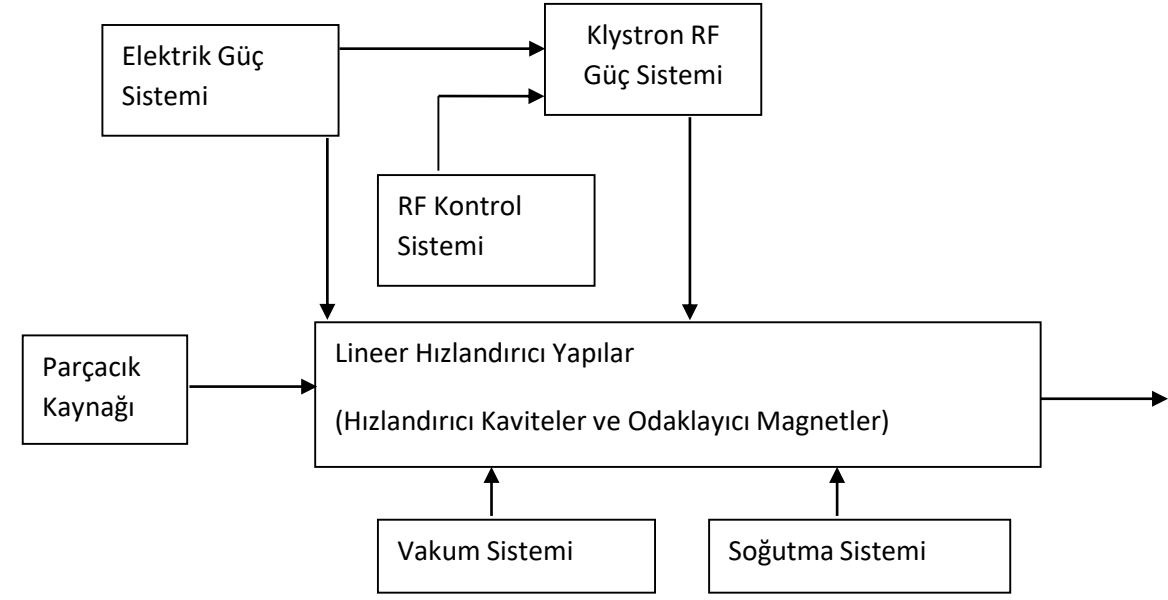
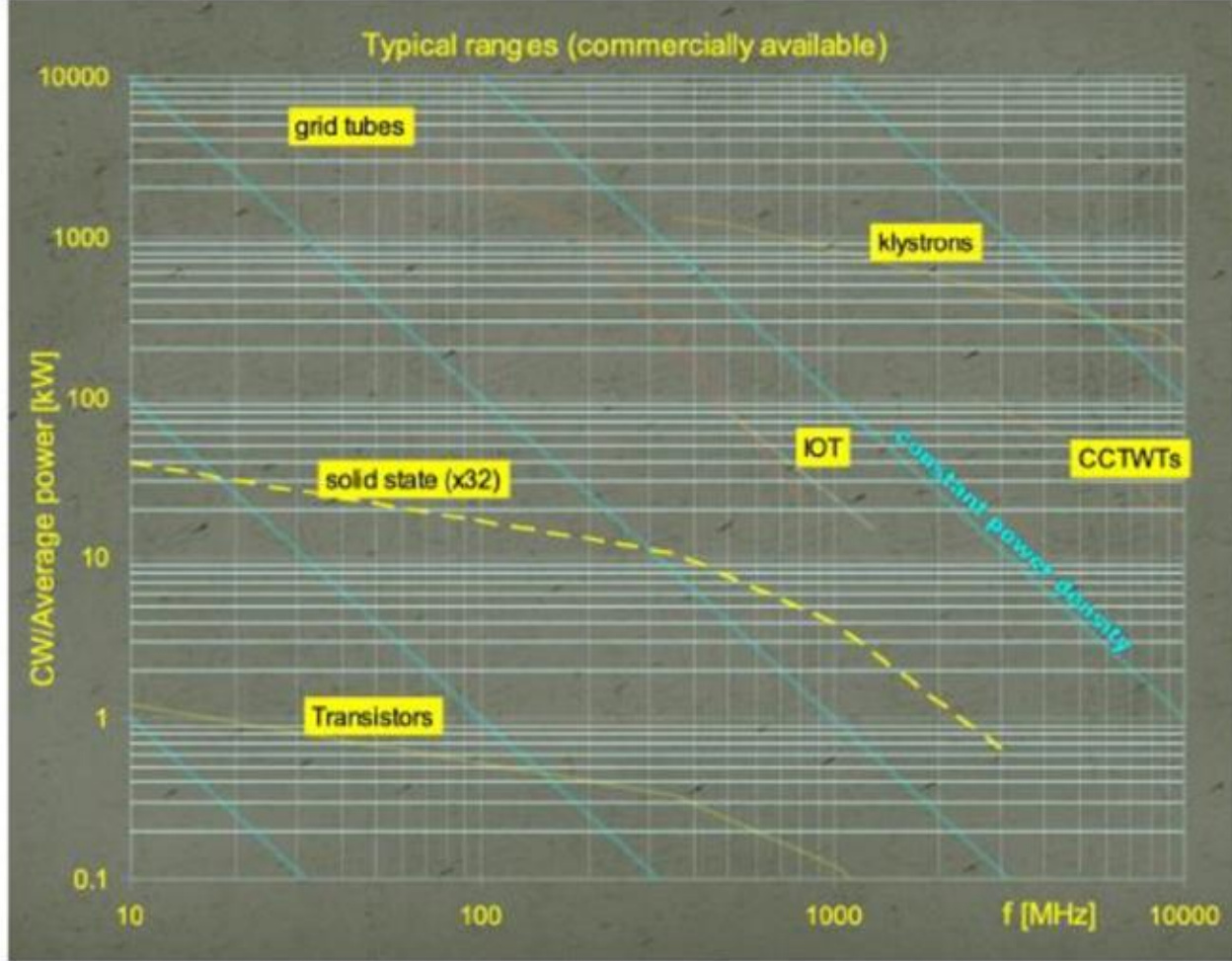
Yapılan çalışma sonrası demetin yayılımı düşmelidir. Buradaki örnekte yayılım 1.1 mm mrad $1\frac{1}{2}$ hücre için 1.5 mm mrad $3\frac{1}{2}$ hücre için elde edilmiştir, Poisson/Superfish ve CST programları kullanılarak.

Demetin Sönümlenmesi



RF Alanlar

Frenkans bandı ve güç kaynağı çeşitleri



Referanslar

- 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